



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE ED AMBIENTALE

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

LA CAPACITÀ AEROPORTUALE

VALUTAZIONE, GESTIONE ed OTTIMIZZAZIONE

Relatore: Chiar.mo prof. Claudio Meneguzzer
Laureando: Stefano Nichele

Anno accademico 2013/2014 (792°)

INDICE

0. INTRODUZIONE	pag. 1
1. LA GESTIONE DELLA CAPACITÀ AEROPORTUALE	pag. 5
1.1 Introduzione	
1.2 Il quadro generale	
1.3 Le Linee Guida per l'assegnazione degli slot	
1.4 Il Regolamento europeo ed il contesto USA	
2- LA CAPACITÀ AEROPORTUALE	pag. 31
2-1 Introduzione	
2-2 I fattori interni ed esterni che incidono sulla capacità	
2-3 La valutazione della capacità secondo la Circolare FAA (1995)	
2-4 I software per la valutazione della capacità	
2-5 Il modello di Blumstein (1959)	
2-6 Il metodo di Gilbo: rappresentazione e stima della capacità (1993)	
2-7 Il metodo di Gilbo: l'ottimizzazione della capacità (1993)	
2-8 Il metodo di Gilbo: esempio numerico	
3. CONCLUSIONI	pag. 85
BIBLIOGRAFIA	pag. 89

INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni, a livello mondiale, si è assistito ad un aumento esponenziale della domanda di trasporto aereo; le motivazioni che ne stanno alla base sono di diversa natura e comportano differenti conseguenze.

Nei Paesi industrializzati, l'aumento tendenziale del livello di disponibilità economica raggiunto dalla popolazione, al netto dei cicli economici negativi di breve-medio periodo, ha comportato un notevole incremento del numero medio di viaggi aerei che vengono compiuti abitualmente. A questa tendenza generale si sono aggiunti gli effetti dell'opera di liberalizzazione delle rotte e dei servizi aerei intrapresa dalle regolamentazioni nazionali ed internazionali emanate nei tempi più recenti, volte a determinare una sempre maggiore competitività tra gli attori presenti sul mercato. In effetti, l'ingresso di nuove compagnie aeree a basso-costi ha ampliato ulteriormente, ed in misura notevole, la platea di potenziali viaggiatori; questa apertura a nuovi soggetti ha comportato, inoltre, una radicale rimodulazione del sistema di offerta di trasporto, andando ad incentivare l'utilizzo di aeroporti secondari o regionali, il cui uso era prima relegato ad altra – limitata – tipologia di utenza (si pensi, ad esempio, agli aeroporti esclusivamente destinati, in origine, all'aviazione generale o alle operazioni di tipo militare).

A livello globale, l'incremento dei volumi di traffico aereo degli ultimi anni è considerevolmente influenzato anche dalla richiesta di *nuova* mobilità proveniente dai Paesi emergenti, caratterizzati da un'economia in notevole sviluppo; in periodi recenti, Nazioni appartenenti a specifiche regioni del Mondo come l'area mediorientale, l'America latina o l'estremo Oriente, hanno richiesto la creazione e lo sviluppo di nuove rotte aeree verso destinazioni originariamente poco (o per nulla) interessate dal traffico aereo. Inoltre, la particolare concentrazione di un'ingente ricchezza in mano ad un ristretto numero di soggetti ha comportato lo sviluppo di precise tipologie di servizi commerciali di altissimo livello che, nei paesi del c.d. primo Mondo, non hanno eguali in termini di variazione percentuale.

L'espansione del mercato aereo, se non regolata, può comportare un evidente decremento del livello di servizio; nello specifico, alcuni grandi aeroporti internazionali hanno visto considerevoli aumenti dei livelli di picco della domanda a cui possono essere soggetti o in particolari periodi dell'anno, della settimana o del giorno, o con una distribuzione maggiormente uniforme in pressoché tutti i periodi. Come evidente, questi livelli possono

comportare un aumento della frequenza con cui si presentano i fenomeni di congestione dell'infrastruttura; come in ogni altro sistema di trasporto, ad un ricorrente eccesso di domanda rispetto alla capacità disponibile, il gestore del sistema di offerta può rispondere con due possibili soluzioni: l'incremento infrastrutturale, con conseguenti ingenti investimenti, o la regolazione della domanda, attraverso una qualche forma di regolamentazione che va tuttavia decisa (e pubblicizzata) a priori attraverso norme precise e trasparenti.

Dunque, lo scopo del presente lavoro è fornire una visione generale dell'analisi della capacità delle infrastrutture aeroportuali, in termini della sua valutazione, gestione ed ottimizzazione; difatti, gli aeroporti sono i punti nevralgici del sistema di trasporto aereo globalmente inteso e, se non progettati o valutati adeguatamente, possono rappresentare una delle più importanti fonti di inefficienze per questo modo di trasporto (in confronto, ad esempio, alle aerovie ed alle problematiche connesse).

La valutazione della capacità degli aeroporti esistenti permette la verifica (o meno) dell'adeguatezza delle infrastrutture disponibili rispetto alla domanda che le va a caricare; la comparazione fra la capacità esprimibile e la domanda d'uso consente di evidenziare, da un punto di vista tecnico, eventuali carenze presenti, le quali andranno colmate il prima possibile al fine di evitare cadute del livello di servizio del sistema aeroportuale.

L'ottimizzazione è fondamentale nel caso della valutazione di ipotesi di modifica o miglioramento delle infrastrutture esistenti; infatti, con un'attenta analisi dei dati e con un'accresciuta consapevolezza del necessario e maggiore sfruttamento delle infrastrutture fisiche già presenti, i metodi di ottimizzazione *dovrebbero* rappresentare la prima risposta all'aumento di domanda, così da non procedere ad un dispendio di ingenti risorse per miglioramenti fisici della capacità che, se non altrettanto ottimizzati e sfruttati, potrebbero rivelarsi comunque inefficaci rispetto alla domanda da soddisfare.

Questo studio si suddivide in due sezioni. Nel primo capitolo vengono delineate alcune delle problematiche riguardanti gli aspetti normativi e gestionali dell'infrastruttura, con specifico riguardo all'assegnazione degli slot aeroportuali; in effetti, un meccanismo di ripartizione della capacità fra i diversi vettori è fondamentale per quei contesti aeroportuali in cui va garantito un uso neutrale e concorrenziale della limitata (o insufficiente) capacità esplicabile dalle infrastrutture disponibili.

Nel secondo capitolo, dal carattere più tipicamente ingegneristico, vengono descritti alcuni dei metodi e modelli che stanno alla base della valutazione e dell'ottimizzazione della capacità. Dopo aver delineato i fattori esterni ed interni che incidono sulla capacità, si dà una descrizione degli strumenti utilizzabili per la sua valutazione, ovvero: la circolare

emessa dalla FAA nel 1995 per il calcolo della capacità e del livello di servizio ed alcuni dei software disponibili per l'analisi delle diverse grandezze in gioco, da scegliersi in funzione del grado di complessità e dettaglio che si vuole dare allo studio. Sono poi forniti un modello matematico che mette a confronto le principali variabili che incidono sulla capacità, ed infine un metodo per la valutazione della capacità e per la sua ottimizzazione in cui risulta evidente, anche grazie ad un esempio numerico, il beneficio di adattare la capacità alla domanda effettivamente in atto.

CAPITOLO 1

LA GESTIONE DELLA CAPACITÀ AEROPORTUALE

1.1 INTRODUZIONE

Questo capitolo tratta il sistema di assegnazione degli slot negli aeroporti in cui, dato il livello di congestione realizzato, è oltremodo necessaria una gestione accorta della capacità, così da consentire un utilizzo il più efficiente possibile delle infrastrutture presenti.

Si delineano le principali tematiche dell'argomento: le ragioni che portano all'implementazione di questo sistema di assegnazione (solo) in alcuni aeroporti, perché e come la domanda di trasporto aereo può influenzare questa necessità di regolazione ed in quali termini leggi nazionali ed internazionali regolano il mercato del trasporto aereo in ambito aeroportuale.

Come è comunemente riconosciuto, le procedure ed i processi che permettono l'assegnazione degli slot sono una questione di non poco rilievo – anche dal punto di vista strettamente economico, per le conseguenze che possono causare – e, soprattutto, necessitano di una sempre maggiore uniformità a livello globale: vengono dunque esaminati alcuni dei pro e contro dei Regolamenti attualmente vigenti, sviluppati dalle competenti Autorità, sia in ambito Europeo che in ambito Statunitense.

1.2 IL QUADRO GENERALE

Negli ultimi decenni, la continua crescita della domanda di trasporto aereo ha aumentato le problematiche connesse alla scarsa capacità disponibile negli aeroporti caratterizzati da fenomeni di congestione: naturalmente, è evidente che più un aeroporto soffre di fenomeni collocati al limite della saturazione, più è importante garantire che le infrastrutture presenti siano utilizzate nel miglior modo possibile.

Negli aeroporti congestionati, la necessità dell'istituzione di un sistema di assegnazione degli slot è dovuta ad una carenza di ordine infrastrutturale; ciò significa che il sistema di offerta aeroportuale non è riuscito a reggere il passo della domanda e dunque non può fornire la capacità richiesta in termini di movimenti nella pista di volo o di operazioni nell'aerostazione passeggeri o nelle altre strutture aeroportuali. Negli ultimi anni, negli

Stati Uniti, molti aeroporti hanno sviluppato considerevolmente le loro infrastrutture; si pensi, ad esempio, agli aeroporti di Boston Logan o Chicago O'Hare, solo per citarne alcuni; viceversa, in Europa, gli aeroporti che hanno subito notevoli modifiche dal punto di vista delle infrastrutture fisiche sono stati quantitativamente molto limitati (principalmente Madrid Barajas ed il costruendo aeroporto di Berlino Brandeburgo).

Di conseguenza, per garantire a tutti gli operatori interessati un uso paritario delle infrastrutture aeroportuali interessate da fenomeni di congestione rilevante, bisogna fare affidamento ad un sistema di assegnazione di slot (le cc.dd. bande orarie previste dalla normativa italiana): *una compagnia aerea* (o un generico operatore di trasporto aereo) *che voglia effettuare un'operazione nell'aeroporto deve essere in possesso di uno slot*, ovvero un periodo di tempo specificatamente assegnatole per poter compiere un atterraggio o un decollo nell'infrastruttura interessata. Più specificatamente, l'autorizzazione all'uso di uno slot consente al vettore che lo riceve anche l'utilizzo di tutte le infrastrutture e gli elementi di supporto che agevolano lo svolgimento dell'operazione (dalle vie di rullaggio, ai piazzali di sosta o *gates* di imbarco ed alle strutture di ausilio al terminal passeggeri).

Tuttavia, va puntualizzato che l'istituzione di un sistema di utilizzo delle infrastrutture secondo un meccanismo di assegnazione di permessi *non* va considerato come una soluzione al problema rappresentato dalla carenza infrastrutturale dell'aeroporto; viceversa, esso *dovrebbe rappresentare* solamente una soluzione *ad interim* che permetta di gestire l'infrastruttura (ed i suoi livelli di domanda d'uso praticamente coincidenti alla capacità esprimibile) per il periodo di tempo necessario affinché vengano progettati e realizzati quegli interventi di espansione fisica delle infrastrutture che siano in grado di dare una risposta definitiva ai problemi evidenziati.

La decisione di istituire o meno un sistema di controllo degli slot in un aeroporto ricade tra le responsabilità di predefinite Autorità nazionali che la assume dopo un'attenta analisi comparativa fra la capacità esprimibile dall'aeroporto e la domanda d'uso che lo carica, attualmente oppure secondo previsioni future.

In totale, nel Mondo, ci sono attualmente¹ 162 aeroporti soggetti ad un sistema di assegnazione degli slot ed in cui vige un totale coordinamento delle operazioni che vi vengono realizzate; gli aeroporti con questa caratteristica sono detti *pienamente-coordinati* ovvero – secondo la classificazione delle Linee Guida per l'assegnazione degli slot aeroportuali emesse dall'Associazione Internazionale delle compagnie aeree *International Air*

¹ Dato aggiornato a febbraio 2014 [fonte: sito internet dell'Associazione mondiale dei Responsabili per il coordinamento aeroportuale, www.wwacg.org]

Transport Association (IATA) – gli aeroporti di livello 3² sono continuamente aumentati negli ultimi anni: erano 136 nel 2000, 155 nel 2010 e 159 nel 2012- Inoltre, secondo un'indagine dell'ICAO – *International Civil Aviation Organization*, a marzo 2013 più di 120 aeroporti del mondo sperimentavano una qualche forma di congestione: è dunque ragionevole ritenere che se non vi saranno investimenti sul lato infrastrutturale, molti di questi potranno venire classificati come aeroporti di livello 3 nell'immediato futuro.

Come è tipico delle analisi sui sistemi di trasporto in generale, anche per quel che riguarda il trasporto aereo particolari caratteristiche della domanda possono causare effetti negativi considerevoli sul sistema di trasporto globale: a seconda della tipologia di aeroporto, in effetti, l'assegnazione di slot può vedere dei picchi in particolari fasce orarie del giorno oppure in predefiniti periodi dell'anno. Ad esempio, la pratica di procedere da parte delle compagnie aeree alla creazione di un c.d. *hub* ad un aeroporto crea delle ondate di voli in arrivo (tendenzialmente di tipo regionale) che sono seguiti, in un breve lasso di tempo, da un altrettanto numeroso gruppo di voli in partenza (di solito, di lungo raggio). Naturalmente, questa pratica contribuisce a minimizzare i perditempo dei passeggeri e dello stesso personale delle compagnie aeree, tuttavia, comporta una domanda d'uso sensibilmente più alta in brevi periodi della giornata, in cui si possono dunque verificare sofferenze in termini di capacità.

Secondo l'Organizzazione che rappresenta internazionalmente i gestori delle infrastrutture aeroportuali – l'*Airports Council International* (ACI) – se venisse attuata una redistribuzione su base temporale del traffico aereo da parte delle compagnie, essa permetterebbe di alleviare notevolmente il valore di picco della domanda per una grande parte di infrastrutture aeroportuali; tuttavia, questa scelta difficilmente troverebbe il favore dei passeggeri che prediligono voli ad orari compatibili e con corrispondenze tra aeroporti con i minimi tempi di turnover aeroportuali. Dunque, un rimedio per questi periodi di punta potrebbe derivare dall'imposizione di ulteriori tariffe *ad hoc* che i gestori aeroportuali potrebbero far pagare alle compagnie aeree per l'utilizzo delle infrastrutture in particolari orari del giorno, così da incentivare un effetto redistributivo della domanda (una c.d. tariffa di punta): l'istituzione di una tassa in aeroporti congestionati per l'uso dell'infrastruttura nelle ore di picco potrebbe infatti indurre nelle compagnie aeree un'aumentata consapevolezza

² Le Linee Guida della IATA verranno trattate ampiamente nella sezione successiva di questo capitolo; secondo questo documento, gli aeroporti vengono definiti di *livello 3* quando la domanda per l'utilizzo della pista di volo e dei *gates* aeroportuali eccede la capacità dell'aeroporto, richiedendo dunque la necessità di procedere all'assegnazione degli slot alle compagnie aeree, ed agli avio-operatori in generale, secondo le direttive contenute nello stesso documento dell'Organizzazione, in cui viene descritto il sistema di coordinamento degli orari di volo negli aeroporti. [IATA, 2013]

dei costi di investimento che i gestori aeroportuali sono costretti a sopportare per implementare ulteriori opere infrastrutturali proprio per far fronte a livelli di domanda molto alti ma che si verificano per brevi (o brevissime) finestre temporali.

In linea di principio, dal momento che l'assegnazione degli slot è imposta dalle diverse Autorità nazionali sui singoli aeroporti di loro competenza (o, al limite, su più aeroporti facenti parte della stessa area geografica ristretta), si potrebbe pensare che essa sia da considerarsi come una questione puramente locale, riguardante un singolo fatto in un singolo Paese. Tuttavia, la situazione è differente; infatti, una decisione assunta in un particolare aeroporto può avere delle conseguenze tecniche anche in altri contesti dell'intera rete di trasporto: l'impatto di eventuali decisioni in una particolare situazione può scaricarsi sull'accesso al mercato e sulle operazioni che vengono svolte da altri aeroporti, anche appartenenti ad un altro Stato. Ad esempio, imporre l'utilizzo di una predeterminata tipologia di aerei in un dato aeroporto ha influenza sulle rotte che vi puntano o transitano e sui servizi di trasporto che una compagnia aerea può istituire o meno nei collegamenti con gli altri aeroporti.

Di conseguenza, è molto importante che sulla gestione degli slot aeroportuali valgano le stesse regole a livello globale; un riferimento tipo globalmente accettato – come le Linee Guida della IATA (IATA-WSG) – dovrebbe essere utilizzato come modello per l'implementazione di regolamenti locali; viceversa, essi potrebbero comportare conseguenze negative per le compagnie aeree, i loro clienti e l'ambiente in genere, in termini di livello di servizio, di competitività o di garanzia sul beneficio sociale pubblico da garantire (e.g. le tratte in onere di servizio pubblico o le cc.dd. *PSO routes*).

Attualmente, il sistema prevalente di assegnazione degli slot aeroportuali si basa sui cc.dd. *grandfather rights* e sulla regola *use it or lose it*³: in aggiunta, alcuni slot possono essere resi disponibili – nel c.d. *slot pool* – solo per determinati soggetti titolati (le compagnie aeree *new entrant* o quelle già presenti nell'aeroporto, ma in numero ridotto⁴).

Gli slot contenuti nello *slot pool* possono derivare da:

- slot ritirati dalle competenti Autorità per il mancato soddisfacimento del requisito dell'utilizzo di almeno l'ottanta per cento degli slot assegnati;
- slot resi disponibili da un'aumentata capacità aeroportuale, grazie ad interventi infrastrutturali o procedurali, oppure

³ La regola *use it or lose it* è anche definita *regola 80/20*: la precedenza dell'assegnazione su base storica – i *grandfather rights* – è garantita alle compagnie aeree che sono in grado di dimostrare al Coordinatore che nella stagione equivalente precedente hanno utilizzato gli slot assegnati per almeno l'ottanta per cento del tempo totale.

⁴ La definizione dello status di *new entrant* o di compagnie con numero limitato di slot varia tra i Regolamenti.

- slot rilasciati da compagnie aeree soggette a vari fenomeni di insolvenza, le quali si vedono ritirata la licenza dalle competenti Autorità.

In epoca recente, la visione prevalente di alcuni economisti ed altri studiosi della materia prevede che l'attuale sistema di assegnazione degli slot aeroportuali sia causa di una natura anti-economica del settore del trasporto aereo. In alcuni Paesi, sono stati dunque portati avanti alcuni tentativi per introdurre meccanismi di mercato nei procedimenti di assegnazione degli slot (si pensi, ad esempio, al mercato secondario sviluppato negli aeroporti di Londra Heathrow o Gatwick).

1.3 LE LINEE GUIDA PER L'ASSEGNAZIONE DEGLI SLOT (IATA, 2013)

Le Linee Guida globali (WSG, *Worldwide Slot Guidelines*) forniscono il quadro generale sull'assegnazione e gestione degli slot aeroportuali.

Le WSG sono realizzate dalla IATA sotto la supervisione del JSAG (*Joint Slot Advisory Group*) che è composto da un numero uguale di compagnie aeree appartenenti alla IATA e di Responsabili del coordinamento aeroportuale. Operativamente, il JSAG approva tutte le modifiche a cui sono soggette le Linee Guida; questi emendamenti al documento dovranno poi essere confermati dai Capi Delegazione durante le *IATA Slot Conference*, ricevendone così pieno accoglimento. Questa procedura garantisce che vengano approvate modifiche alle WSG solo col consenso più ampio possibile ed evita che possano avvenire modifiche unilaterali del documento da parte di un singolo *stakeholder*.

Nonostante la loro introduzione risalga al 1976, grazie ad un loro costante aggiornamento, queste Linee Guida rappresentano tuttora la migliore pratica globalmente accettata per gli attori del settore del trasporto aereo – Governi, compagnie aeree ed aeroporti – che hanno bisogno di ottimizzare la scarsa capacità aeroportuale disponibile.

Le Linee Guida hanno due scopi principali:

- consentire efficaci operazioni aeroportuali,
- garantire l'ottimo uso delle infrastrutture, massimizzandone l'efficienza.

Nel perseguire questi obiettivi, le Linee Guida si basano su quattro capisaldi:

1. *Certezza dell'accesso al mercato*

Come evidente, l'accesso al mercato del trasporto aereo richiede enormi investimenti sia per le compagnie aeree sia per i Governi nazionali che per i gestori delle infrastrutture aeroportuali.

In effetti, entro il 2020 si prevede che le compagnie aeree spenderanno 1300 miliardi di dollari per l'acquisto di aeromobili dalle caratteristiche avanzate; data l'entità dell'investimento in gioco, è cruciale che queste compagnie aeree siano in grado di programmare l'utilizzo di questi aerei su rotte che corrispondano ai loro piani economici. Anche se per alcuni studiosi i *grandfather rights* possono essere una fonte di anti-economicità del sistema di assegnazione di slot, essi hanno lo scopo di garantire alle compagnie aeree già presenti nel mercato la certezza di potervi rimanere almeno per i successivi 25-30 anni, permettendo così la definizione di un programma di ammortamento di lungo periodo.

Similmente, il sistema prevede una certezza di accesso al mercato anche a nuove compagnie aeree; al fine di garantir loro la possibilità di stabilire un programma di voli dimensionato sulle loro specifiche esigenze, ad esempio, alcune regole presenti nei Regolamenti riservano il 50 per cento degli *slot pool* a questa tipologia di compagnie aeree.

2. *Flessibilità del sistema di assegnazione*

Tipicamente, le compagnie aeree vorrebbero programmare ed utilizzare gli slot assegnati loro a propria totale discrezione; più un Regolamento si avvicina a questa completa libertà, maggiormente possono procedere ad uno *scheduling* adeguato alla loro domanda di trasporto specifica, adattandolo ai loro servizi programmati e ad eventuali eventi accidentali che possano avvenire durante l'ordinaria operatività. In un contesto ideale, le compagnie aeree non vorrebbero avere limitazioni sulle operazioni da programmare, essendo libere di effettuare uno *scheduling* di voli sulle rotte e con la frequenza che ritengono più economicamente efficiente. Inoltre, le compagnie tendono a non gradire un collegamento diretto fra rotte aeree e slot aeroportuali in quanto vorrebbero essere libere di cambiare, a proprio piacimento, le destinazioni servite senza ulteriori richieste ad enti di controllo o coordinamento, utilizzando gli slot già assegnati loro.

3. *Sostenibilità dei costi*

Le compagnie aeree non dovrebbero essere costrette a pagare tasse esorbitanti per operare un decollo o un atterraggio negli aeroporti congestionati; di fatto, da un punto di vista finanziario, il costo per le richieste di slot alle competenti Autorità non dovrebbe rendere poco appetibile l'operazione dal punto di vista economico.

4. *Trasparenza del sistema di assegnazione*

Come riportano molti Regolamenti nazionali, gli slot devono essere assegnati sulla base di un procedimento “neutrale, trasparente e non discriminatorio”: al fine di evitare influenze da parte di singole parti interessate, il Responsabile per l’assegnazione degli slot dovrebbe essere indipendente sia dal punto di vista finanziario sia dal punto di vista funzionale-operativo.

Come prima affermato, le Linee Guida rappresentano le migliori pratiche globalmente accettate per i sistemi di assegnazione degli slot e, nella loro intenzione, forniscono un potenziale quadro generale: dal momento che il processo di programmazione dei voli è un fatto globale, le regole nazionali dovrebbero essere congruenti tra loro così da garantire alle compagnie aeree di poter compiere operazioni efficienti, potendo (e dovendo) rispettare le *stesse* regole in ogni contesto geografico.

Tuttavia, il sistema di assegnazione di slot è aperto ai diversi regolamenti attuativi che possono venire emanati a livello locale, i quali possono non seguire necessariamente le Linee Guida. Ad esempio, in anni recenti, la IATA ha evidenziato alcune problematiche in Cina, dove le Autorità non informavano le relative compagnie aeree della loro acquisizione di slot fino a due mesi dopo la *Slot Conference*, dando luogo così ad una sostanziale indisponibilità di nuovi slot per le compagnie aeree straniere.

Anche negli Stati Uniti, dove la gran parte degli aeroporti non è soggetta ad un’attività di coordinamento, le competenti Autorità locali possono decidere specifiche regole, imponendo limiti sul numero totale di movimenti giornalieri, sulla dimensione degli aeromobili utilizzabili o sui movimenti in orario notturno. Inoltre, in questo contesto, ottenere uno slot è solo il primo passo da compiere per poter svolgere un’operazione aeroportuale: le compagnie aeree devono negoziare anche per l’ottenimento delle infrastrutture del terminal o dei gates aeroportuali con i rispettivi gestori o proprietari. Chiaramente, queste negoziazioni si traducono in un aumento dei costi per le compagnie aeree che, nella gran parte dei casi, si tradurrà in tariffe maggiorate per i passeggeri.

Le Linee Guida IATA sono state in larga misura incorporate in leggi nazionali. Tuttavia, è possibile che in alcune Nazioni leggi locali regolamentino diversamente gli stessi argomenti delineati dalle WSG; in questi casi, i Regolamenti nazionali prevalgono sulle WSG. Infatti, le Autorità nazionali non sono obbligate ad attuare le Linee Guida IATA ma sono solo incoraggiate ad uniformare le loro norme e procedure a quelle che sono descritte nelle Linee Guida: l’uso di questo documento IATA come base di riferimento di tutte le normative nazionali consentirebbe l’armonizzazione a livello globale del sistema di asse-

gnazione degli slot e, idealmente, farebbe modo che qualunque volo tra qualunque coppia di aeroporti del Mondo dovrebbe rispettare le stesse medesime procedure e gli stessi medesimi vincoli. Questa possibilità sarebbe cruciale per consentire alle compagnie aeree di sfruttare al massimo le proprie risorse, potendo basare la loro attività di *scheduling* sulle stesse regole.

La classificazione degli aeroporti

Ai fini di un eventuale coordinamento, gli aeroporti possono essere classificati dalle competenti Autorità in tre livelli a seconda del loro livello di congestione:

- livello 1: aeroporti in cui la capacità delle infrastrutture è generalmente adeguata a garantire la domanda di trasporto in ogni periodo;
- livello 2: aeroporti dove c'è una congestione potenziale durante alcuni periodi del giorno, della settimana o della stagione, che può essere risolta su base volontaria attraverso la cooperazione tra compagnie aeree: deve essere nominato un Facilitatore degli orari il quale aiuta le compagnie aeree a programmare i voli così da renderli compatibili fra loro (in termini di eventuali conseguenze sul livello di congestione);
- livello 3: aeroporti dove le infrastrutture non forniscono una capacità sufficiente a soddisfare la domanda d'uso, oppure dove le Autorità governative hanno imposto condizioni che rendono impossibile il soddisfacimento della domanda. Deve essere nominato un Coordinatore che assegna gli slot alle compagnie aeree o agli altri vettori aeroportuali che usano o intendono utilizzare l'infrastruttura.

Aeroporti di livello 1

Nello specifico, le compagnie aeree che operano o intendono operare in questo livello di aeroporti dovrebbero dare avviso delle loro operazioni programmate al loro agente corrispondente ed al gestore aeroportuale.

Il gestore aeroportuale dovrebbe monitorare la domanda a cui sono soggette le sue infrastrutture e dovrebbe sviluppare capacità addizionale ogniqualvolta fosse richiesta per soddisfare al meglio la domanda. Esso ha anche la responsabilità di collaborare con gli agenti corrispondenti delle compagnie aeree per evitare che vincoli non necessari impattino sulle operazioni che vi si possono svolgere; in effetti, gli agenti locali hanno la grande responsabilità di assicurare che non si creino inefficienze facilmente risolvibili (in teoria) ma imputabili, di fatto, ad una carente programmazione o ad inadeguate risorse destinate alle loro operazioni.

Aeroporti di livello 2

In questo livello di aeroporti, le Linee Guida mettono esplicitamente in luce un potenziale fenomeno di congestione, ma *non per tutti i periodi*. Come anticipato, un Facilitatore degli orari deve essere nominato dalla competente Autorità affinché proceda a consultazioni con il gestore aeroportuale, con le compagnie che intendono utilizzare le infrastrutture e con i loro rappresentanti (ad esempio, con referenti della IATA).

I Facilitatori devono dimostrare di possedere alcuni prerequisiti prima della loro designazione: devono possedere un'esperienza pregressa nel settore del coordinamento e/o devono essere stati Coordinatori precedentemente. I Facilitatori devono avere sufficienti mezzi e risorse per fornire i servizi di facilitazione nel rispetto di queste Linee Guida. Come richiesto ad altre figure di controllo, il Facilitatore deve essere indipendente ed agire in modo neutrale, trasparente e non discriminatorio.

Tutte le compagnie aeree che operano od intendono operare in un aeroporto di livello 2 devono fornire ed aggiornare i dettagli delle loro operazioni al Facilitatore. Le compagnie aeree devono mostrare la volontà di procedere a riprogrammazione dei loro piani di volo per evitare di superare i parametri imposti dal Facilitatore, altrimenti l'aeroporto potrebbe essere designato come un livello 3 e richiedere di conseguenza un sistema obbligatorio di assegnazione degli slot. È utile che le compagnie aeree discutano e revisionino il loro programma delle operazioni con il Facilitatore ed il gestore aeroportuale (ogniquale sia opportuno). Il gestore aeroportuale deve fornire la massima disponibilità ed il massimo aiuto al Facilitatore affinché ottenga dalle compagnie aeree le informazioni richieste. Inoltre, dovrebbe fornire le infrastrutture necessarie per permettere lo svolgimento delle operazioni programmate nel rispetto del concordato livello di servizio.

Negli aeroporti di livello 2, gli slot non sono assegnati. Il processo di facilitazione si basa sulla cooperazione tra compagnie aeree e Facilitatore. Come negli aeroporti di livello 3, nello scambio di informazioni con il Facilitatore, le compagnie aeree devono utilizzare formati di messaggio standard, descritti dal relativo manuale IATA (il c.d. manuale SSIM) che fornisce i dettagli necessari per queste comunicazioni.

Prima delle *Slot Conference*, la domanda d'uso delle compagnie aeree dovrebbe essere valutata con il gestore aeroportuale e, in caso, dovrebbero essere identificate le eventuali carenze infrastrutturali. Alla fine di questa revisione in regime di collaborazione tra attori differenti, se elementi delle infrastrutture aeroportuali possono essere migliorati per venire incontro alla domanda, allora non sarà necessario alcun aggiustamento della programmazione originariamente ipotizzata. È chiaro che le compagnie aeree e gli altri vettori

dovrebbero aggiornare il prima possibile il Facilitatore di ogni variazione alle loro operazioni programmate. Allo stesso modo, i Facilitatori dovrebbero informare il gestore aeroportuale di ogni modifica alle operazioni programmate.

Aeroporti di Livello 3

La definizione degli aeroporti di livello 3 è più complessa di quella relativa ai due livelli precedenti, ovvero:

- l'espansione delle infrastrutture, tale che possa permettere il soddisfacimento della domanda d'uso, non è fattibile nel breve periodo, e
- i tentativi di risolvere il problema attraverso una modifica volontaria della programmazione hanno fallito o sono stati inefficaci;
- come risultato, è richiesto un processo di assegnazione degli slot, dal momento che è necessario che ogni compagnia aerea sia beneficiaria di uno slot rilasciato da un Coordinatore, al fine di atterrare o decollare durante i periodi di tempo coperti dallo specifico slot assegnato.

Di conseguenza, si è esplicitamente puntualizzato che un aeroporto è definito come aeroporto di livello 3 *se* la capacità delle sue infrastrutture non è capace di soddisfare la domanda a causa di carenze fisiche oppure *se* il Governo – o l'Autorità competente – ha imposto particolari limiti amministrativi secondo i quali le infrastrutture aeroportuali non possono soddisfare la domanda anche se, in linea di principio, esse sarebbero fisicamente in grado di farlo.

Dunque, le Linee Guida richiedono che, per essere designato di livello 3, un aeroporto non deve soddisfare la domanda in modo *significativo* e non devono essere possibili soluzioni nel breve periodo. Al verificarsi di queste condizioni, è richiesto il coordinamento delle operazioni in questi aeroporti e si deve procedere ad un sistema di assegnazione degli slot aeroportuali.

Negli aeroporti di livello 3, la competente Autorità deve assicurare la nomina di un Coordinatore, al posto di un Facilitatore come era negli aeroporti di livello 2: secondo la definizione fornita dalle stesse Linee Guida, il Coordinatore è nominato *per agevolare la gestione della capacità aeroportuale*.

Come già visto, tutte le compagnie aeree che intendono operare in questo livello di aeroporti devono possedere uno slot autorizzato. Dal momento che gli slot nei periodi di punta potrebbero non essere sempre disponibili, è essenziale che le compagnie aeree che operano o che intendono operare nell'aeroporto sviluppino programmi di voli alternativi, nel caso in cui non fossero effettivamente destinatarie di uno slot autorizzato. Nel caso di

una ridotta quantità di slot disponibili oppure di slot totalmente assenti, le compagnie aeree devono essere in grado di trovare altri aeroporti che possano soddisfare le loro operazioni programmate. A questo riguardo, un importante ruolo può essere giocato dai cc.dd. aeroporti secondari, o, aeroporti regionali. Ad esempio, negli ultimi tempi, il Consiglio Europeo ha fatto un'importante proposta concernente la disponibilità ed il libero accesso ai dati degli aeroporti secondari (dunque, non coordinati) da parte dei Coordinatori; tutto ciò al fine di sfruttare efficacemente la loro riserva di capacità in occasione di eventi eccezionali programmati o accidentali, in cui gli aeroporti principali potrebbero andare in sofferenza di capacità.

L'analisi della domanda in confronto alla capacità: i cambiamenti di livello

Nel processo di coordinamento, il ruolo degli enti gestori degli aeroporti è limitato ad assicurare che i parametri di coordinamento siano decisi in accordo con le diverse parti in gioco e che siano aggiornati due volte all'anno. Dove i vincoli persistano, il gestore aeroportuale dovrebbe esaminare la capacità ed implementare dei miglioramenti così da permettere – il prima possibile – una ridefinizione dell'aeroporto come un livello 1 o, al massimo, come un livello 2-

Di conseguenza, l'analisi della capacità disponibile riguarda l'ente gestore che a questo scopo deve utilizzare validi ed appropriati metodi di analisi; inoltre, la domanda e la capacità dovrebbero essere valutate ogniqualvolta ci siano significative modifiche alla capacità aeroportuale, alle pratiche operative del trasporto aereo o agli schemi della domanda d'uso da parte delle compagnie aeree.

L'analisi deve determinare i vincoli che impediscono il soddisfacimento della domanda ed identificare le opzioni attuabili per andare oltre queste carenze attraverso dei miglioramenti o cambiamenti di tipo infrastrutturale, operativo o riguardanti politiche gestionali.

Questa valutazione deve tenere conto degli indicatori più importanti concernenti il livello di servizio che le infrastrutture attualmente disponibili possono garantire: ad esempio, si possono calcolare il numero degli aeromobili in coda (le code in un'infrastruttura aeroportuale possono avvenire in diversi contesti e nello svolgimento di diverse operazioni), il grado di congestione oppure il livello di ritardo medio.

I risultati dell'analisi dovrebbero essere resi disponibili alle parti interessate ai fini di incoraggiare un'adeguata cooperazione e di incentivare il superamento di ogni vincolo o restrizione alla domanda.

L'obiettivo di questa analisi dovrebbe essere il miglioramento dell'abilità dell'aeroporto nell'accogliere la domanda così da evitare il cambiamento di livello da 1 a 2 oppure dal livello 2 al livello 3. Al fine di ottenere la migliore resa dalle infrastrutture disponibili e di incontrare nel modo più efficiente la domanda, c'è la necessità di rilevare le discrepanze tra le capacità esplicabili dalle diverse componenti dell'aeroporto.

L'analisi fra domanda e capacità ha anche un altro scopo principale: dovrebbe essere utilizzata anche per identificare, ridurre e rimuovere i vincoli che hanno portato l'aeroporto ad essere classificato di livello 2 o di livello 3, così da permettergli la ridefinizione al livello 1.

I cambiamenti di livello da 1 a 2 sono decisi dall'Autorità competente di sua iniziativa, oppure seguendo una richiesta avanzata o dall'ente gestore dell'aeroporto o da almeno il 50 per cento delle compagnie che vi operano. Quando un aeroporto cambia di livello, passando al livello 3, c'è la necessità di determinare i livelli di utilizzo degli slot per ogni compagnia aerea nell'aeroporto durante la precedente equivalente stagione. Questo calcolo è fatto sulla base dei dati storici mantenuti dal Facilitatore, inerenti sia i voli programmati sia i voli effettivamente operati. Il Coordinatore dovrà fare i confronti e calcolare le relative percentuali per verificare il soddisfacimento o meno del requisito dell'ottanta per cento.

I parametri di coordinamento devono essere aggiornati due volte all'anno, usualmente durante le riunioni del Comitato di Coordinamento aeroportuale, nominato appositamente (o un equivalente comitato presente).

I cambiamenti in senso negativo delle infrastrutture già presenti nell'aeroporto (e dunque una conseguente riduzione del livello di capacità), da una stagione a quella successiva equivalente, dovrebbero essere evitati ogniqualvolta possibile: inoltre, il Comitato di coordinamento e le compagnie aeree operanti nell'aeroporto dovrebbero essere consultate in anticipo rispetto ad ogni diminuzione di capacità dichiarata. In ogni caso, gli slot storicamente acquisiti *andrebbero sempre confermati*.

Il processo dell'assegnazione di slot: principi chiave e priorità generali

Da un punto di vista temporale, il sistema di assegnazione degli slot è basato sulla tipica suddivisione dell'anno che viene utilizzata in campo aeroportuale; di conseguenza, l'inizio della stagione programmata è abbinato al cambiamento dell'ora legale. Dunque, la stagione estiva inizia l'ultima domenica del mese di Marzo, mentre la stagione invernale comincia l'ultima domenica di Ottobre. Specificatamente, la stagione di *scheduling* estiva dura 30 settimane, mentre quella invernale il suo complementare a 52 , ovvero 22 settime-

ne. Queste durate non sono fine a se stesse dal momento che costituiscono la base per la definizione della durata delle *serie di slot* che vengono assegnate alla compagnie aeree dalle competenti Autorità.

I principi chiave dell'assegnazione di slot secondo le linee guida della IATA prevedono il soddisfacimento dei *grandfather rights* (i.e. il rispetto delle assegnazioni delle precedenti stagioni di programmazione) che sono tendenzialmente validi per una serie di slot e non per slot singoli (o un paio). La stessa misura (lunghezza di slot) fa da base al calcolo del tasso di utilizzo degli slot, che il Coordinatore utilizza per la verifica del soddisfacimento (o meno) dei requisiti di utilizzo degli slot, secondo la regola 80/20.

Le Linee Guida promosse dalla IATA sembrano assumere maggiormente il lato delle compagnie aeree rispetto a quanto facciano i Regolamenti nazionali; in effetti, secondo i principi chiave esplicitati delle WSG, il ritiro degli slot storicamente acquisiti non può avvenire da parte delle competenti Autorità a meno di *comprovato utilizzo fraudolento intenzionale* degli slot assegnati. Inoltre, secondo le WSG, gli slot possono essere trasferiti o scambiati tra compagnie aeree.

Il meccanismo di assegnazione degli slot, in accordo alle Linee Guida, si appoggia notevolmente sulle Conferenze bi-annuali tenute dalla IATA (le *Slot Conference*). In questi incontri, si valutano l'assegnazione e la gestione degli slot per gli aeroporti di livello 3, come pure la programmazione e gli aggiustamenti degli orari per gli aeroporti di livello 2-

In questi incontri ufficiali, alcune questioni non sono affrontabili: i Coordinatori e i Facilitatori, insieme alle compagnie aeree possono discutere – e finalizzare – le questioni in merito al trasferimento, scambio, cambio, cancellazione o richiesta di nuovi slot mentre non vi è il permesso di discutere su questioni come l'accesso al mercato aereo, la condivisione di slot, le politiche di prezzo o altre caratteristiche concernenti la libera competizione sul mercato tra compagnie aeree.

In anticipo rispetto a queste conferenze, i Coordinatori devono tracciare un piano di assegnazione degli slot basato sull'iniziale richiesta da parte delle compagnie aeree, che tenga conto delle priorità acquisite e delle regole generali previste.

Le regole di priorità generali prevedono che il Coordinatore consideri per primi i servizi ad orario programmato, poi i servizi ad hoc ed infine le altre operazioni generiche.

In questo quadro generale, sono valide le seguenti priorità:

- la prima riguarda l'assegnazione di slot su base storica: gli slot acquisiti, se il soddisfacimento della regola 80/20 è confermato, restano nella disponibilità delle rispettive compagnie aeree;

- la seconda riguarda i cambiamenti agli slot confermati come acquisiti: le compagnie che intendono modificarli hanno priorità rispetto ad altre richieste sugli stessi slot (esclusi quelli confermati storicamente);
- una volta assegnati gli slot su base storica, il Coordinatore deve creare un c.d. *slot pool* che includa i nuovi slot eventualmente resisi disponibili o quelli creati a seguito di un aumento della capacità, i quali saranno assegnati sulla base di criteri specifici; i criteri di assegnazione di questi slot prevedono che almeno il 50 per cento di essi sia destinato alle cc.dd. compagnie aeree *new entrant*, ovvero a vettori che siano già beneficiari di una limitata (o nulla) quantità di slot nell'aeroporto considerato. In merito a questa particolare assegnazione, si evidenzia che:
- il totale delle richieste di slot da parte dei vettori *new entrant* deve essere almeno pari al 50 per cento degli slot presenti nello *slot pool*;
- una compagnia aerea *new entrant*, a cui venga offerto uno slot entro un'ora rispetto all'orario effettivamente richiesto e che non accetti questa disponibilità entro una specifica data di scadenza (usualmente, la fine del primo giorno delle *Slot Conference*), non manterrà più questo status per il resto della stagione,
- se una compagnia aerea *new entrant* non è soddisfatta della risposta ricevuta dal Coordinatore, può chiedere al Comitato di coordinamento aeroportuale la ricerca di una soluzione alternativa.

Una nuova procedura è inoltre prevista per l'assegnazione degli slot e consiste nell'introduzione delle cc.dd. operazioni di durata annuale, che derivano dalle sempre maggiore importanza che riveste il più frequente turnover nel processo di assegnazione degli slot: gli slot che soddisfano questo criterio hanno la precedenza rispetto a richieste che riguardino l'assegnazione di nuovi slot.

All'interno di ogni categoria (cambiamenti di slot o assegnazioni a compagnie aeree *new entrant*), una richiesta di estensione delle operazioni attualmente in corso dovrebbe essere valutata con priorità dal Coordinatore. In effetti, secondo il criterio generale, l'assegnazione su base *grandfather rights* è valida per slot che risultino confermati da una data stagione alla stagione successiva *equivalente* (ovvero, dalla stagione estiva all'estiva successiva, e analogamente per le stagioni invernali). Dunque, nessuna priorità sarebbe garantita, di norma, alle compagnie aeree che volessero confermare la programmazione da una stagione estiva a quella invernale, e viceversa. Al contrario, la regola sulle operazioni di durata annuale mira ad agevolare l'estensione di un'operazione che è in corso in una

stagione ad un intero anno, fornendole una priorità rispetto ad una richiesta ex novo di uno slot.

1.4 IL REGOLAMENTO EUROPEO ED IL CONTESTO USA

Il processo di liberalizzazione avviato nel settore del trasporto aereo europeo a partire dagli anni novanta e la creazione di un mercato unico ha reso evidente la necessità di una più efficace regolamentazione degli slot aeroportuali.

La Comunità Europea ha adottato il regolamento (CEE) n. 95/93 il 18 gennaio 1993, relativo a Norme comuni per l'assegnazione di slot negli aeroporti della Comunità, redatto sulla base dei principi che regolano il sistema di assegnazione degli slot previsto dalle Linee Guida IATA.

In particolare, lo slot è stato definito sin da questa norma come “un permesso dato dal Coordinatore aeroportuale ad un vettore aereo affinché possa utilizzare l'intera gamma di infrastrutture necessarie ad operare un servizio aereo in un aeroporto coordinato, in una data ed in un'ora specifiche, per un movimento di atterraggio o di decollo”.

Da un punto di vista generale, il quadro normativo odierno dell'Unione Europea mira a garantire l'uso più efficiente della (limitata) capacità esistente; questo scopo principale deve essere abbinato al rispetto della massimizzazione dei vantaggi per i consumatori ed alla promozione della concorrenza tra operatori.

Sulla scia degli orientamenti IATA, il primo Regolamento aveva introdotto alcune regole di base del meccanismo di assegnazione degli slot: i *grandfather rights* e la regola *use it or lose it*, come pure alcune delle clausole volte a promuovere l'accesso di nuovi vettori negli aeroporti maggiormente congestionati.

Il regolamento prima richiamato è stato modificato in alcuni aspetti importanti il 21 aprile 2004 dal regolamento (CE) 793/2004: le modifiche comportate da questa norma hanno principalmente contribuito a rendere il sistema di slot più flessibile in termini di assegnazione e di utilizzo; inoltre, hanno rafforzato il ruolo del Coordinatore, permettendo un suo maggiore controllo sul requisito di minimo-utilizzo degli slot assegnati da parte dei singoli vettori aerei.

Il regolamento non rappresenta una norma immutabile: a partire dalla sua emanazione, è stato infatti sempre sottoposto a valutazione ed analisi da parte delle istituzioni europee. Nel corso degli ultimi anni, ad esempio, la Commissione europea ha continuato a monitorare il suo funzionamento, anche tenendo conto di particolari eventi *temporanei*; ad

esempio, il regolamento (CE) n 545/2009, adottato il 18 giugno 2009, ha sospeso la regola *use it or lose it* e ha permesso ai vettori aerei di mantenere per la stagione estiva 2010 gli stessi slot che erano stati attribuiti loro per l'estate 2009, anche in caso di non soddisfacimento del requisito minimo dell'ottanta per cento previsto dalla regola 80/20 (le compagnie aeree non programmarono molti slot a causa dell'acuirsi della crisi economica).

Una regola simile di sospensione temporanea era stata decisa a seguito di altre situazioni: successivamente agli eventi tragici dell'11 settembre 2001, in occasione della guerra in Iraq e dell'epidemia di SARS nel 2003.

Le più recenti analisi condotte nel 2010 e nel 2011 sul funzionamento del Regolamento per conto della Commissione Europea (SDG, 2011) hanno dimostrato che il sistema di assegnazione in atto impedirebbe l'uso ottimale della scarsa capacità disponibile negli aeroporti interessati. Pertanto, la Commissione ha proposto modifiche al regolamento al fine di incentivare l'introduzione di meccanismi di mercato nell'assegnazione degli slot in tutta l'Unione Europea, a condizione che “le garanzie della trasparenza o della concorrenza non falsata siano istituite, tra cui una maggiore indipendenza per le figure responsabili del coordinamento degli aeroporti e dell'assegnazione degli slot”. Nell'intenzione della Commissione, ciò contribuirebbe ad assicurare che gli slot vadano effettivamente a quei vettori capaci di farne l'uso migliore, cosa che permetterebbe di innalzare l'efficienza globale della capacità aeroportuale.

Gli scopi del lavoro di modifica al regolamento attuale, inizialmente assunti come principali dalla Commissione europea, sono stati suddivisi in tre pacchetti legislativi, che devono contribuire a garantire i seguenti aspetti⁵:

- una migliore (al limite, ottimale) assegnazione, e conseguente utilizzo, degli slot negli aeroporti congestionati e soggetti a coordinamento,
- una più forte e fattiva assegnazione degli slot ed un uso più efficace di questa procedura, ed infine
- una competizione più equa tra tutti i vettori aerei che vogliano partecipare alla produzione di mobilità nel sistema di offerta aeroportuale.

Attualmente, come ricordato in precedenza, anche in Europa il meccanismo di assegnazione degli slot si basa sulla designazione degli aeroporti come coordinati o ad orari facilitati: tutti gli Stati membri devono designare un aeroporto come coordinato se un'accu-

⁵ L'iter legislativo della proposta di modifica del Regolamento è ancora in essere, essendo stata approvata con modifiche – rispetto alle indicazioni iniziali della Commissione e del Consiglio europei – dal Parlamento europeo il 12 dicembre 2012.

rata analisi comparativa fra domanda d'uso e capacità dimostri che “c'è un deficit *significativo* nella capacità che non può essere risolto in breve tempo”.

Attualmente, nello Spazio economico europeo (incluso, UE e Confederazione Elvetica) esistono 89 aeroporti pienamente coordinati (*full-coordinated airports*); di questi aeroporti, 62 sono coordinati per l'intero anno di programmazione mentre 27 sono coordinati solo stagionalmente. In particolare, la maggior parte degli aeroporti coordinati stagionalmente è collocata nell'Europa meridionale, principalmente in Grecia e Spagna, dove le forti carenze infrastrutturali risultano maggiormente evidenti a causa del notevole livello di domanda che deve essere soddisfatto specificatamente nel periodo estivo dell'anno.

A seguito di tale designazione, lo Stato membro deve nominare un Coordinatore per l'aeroporto (o un Facilitatore degli orari, nel caso di aeroporti con potenziale congestione) il quale deve essere “una persona fisica o giuridica qualificata, con una vasta esperienza di coordinamento e che sia coinvolta nella pianificazione dei movimenti di aeromobili dei vettori aerei”. In effetti, come già esplicitamente richiesto dalle WSG-IATA, il Coordinatore designato (o il Facilitatore degli orari) deve essere dotato di caratteristiche e competenze adeguate.

Nel mercato del trasporto aereo italiano gli aeroporti soggetti a coordinamento annuale sono riassunti nella tabella seguente⁶:

Bergamo	Milano Linate	Roma Ciampino
Cagliari	Milano Malpensa	Roma Fiumicino
Catania	Napoli	Torino
Firenze	Palermo	Venezia

Limitatamente alla sola stagione estiva, risultano coordinati anche gli aeroporti di Lampedusa e di Pantelleria. Infine, si osserva che gli aeroporti di Bologna e di Pisa sono stati designati come ad orari facilitati.

In Italia, un caso particolare di regolamentazione è rappresentato dall'aeroporto di Milano Linate. In questo scalo, la capacità aeroportuale di fatto utilizzabile è fortemente limitata dal punto di vista amministrativo. Infatti, nell'ultimo ventennio, questo aeroporto è stato più volte soggetto ad una serie di decreti ministeriali che hanno contribuito ad impor-

⁶ [Fonte: Circolare ENAC, Serie Economico Amministrativa Legale, EAL-18, Assegnazione di bande orarie sugli aeroporti coordinati nazionali, 24 agosto 2009]

re precise e stringenti condizioni di operatività; alcune delle condizioni da rispettare sono riassunte nel presente elenco⁷:

- il numero massimo di movimenti orari che può essere espletato dall'infrastruttura è limitato a 18 (si osservi che tale valore è di gran lunga inferiore alla capacità che sarebbe fisicamente esprimibile dall'infrastruttura),
- i vettori comunitari possono effettuare collegamenti del tipo *point-to-point* mediante aeromobili della tipologia *narrow body*, ovvero a corridoio unico, tra lo scalo di Linate ed altri aeroporti dell'Unione europea sulla base dei volumi di traffico passeggeri, in arrivo ed in partenza, registrati tra i medesimi aeroporti ed il sistema aeroportuale di Milano nell'anno solare 1999; questi movimenti devono soddisfare i limiti del numero di servizi andata/ritorno, per giorno e per vettore, che sono indicati nella tabella che segue:

nr voli a/r	Tipologia rotte
1	rotte con 0,35-0,7 milioni di passeggeri all'anno <i>oppure</i> rotte per Capitali di Stati membri dell'UE, aventi traffico inferiore a 0,35 milioni di passeggeri all'anno <i>oppure</i> rotte verso aeroporti in Regioni "Obiettivo 1", con traffico inferiore a 0,35 milioni di passeggeri all'anno
2	rotte con 0,7-1,4 milioni di passeggeri all'anno <i>oppure</i> <i>hub</i> con più di 40 milioni di passeggeri all'anno
3	rotte con 1,4- 2,8 milioni di passeggeri all'anno
illimitati	rotte con oltre 2,8 milioni di passeggeri all'anno

Come già anticipato, due degli scopi principali alla base delle decisioni intraprese dalle competenti istituzioni europee è il garantire l'utilizzo più efficiente della capacità disponibile e l'incentivare una sempre maggiore concorrenza fra vettori aerei. In questo ambito rientra la notevole importanza che rivestono sia il mercato secondario degli slot (il c.d. *secondary market*) sia la definizione delle compagnie aeree *new entrant*.

L'assegnazione degli slot attraverso un mercato secondario fra compagnie aeree è molto sviluppato negli aeroporti londinesi; in particolare, ha un notevole impatto nell'aeroporto di Londra Heathrow e, anche se in misura notevolmente inferiore, nello scalo di Londra Gatwick.

⁷ Si tratta dei decreti Burlando emanati alla fine degli anni 90 e dei due ultimi decreti Bersani (Ministero dei trasporti e della navigazione), emessi il 3 marzo 2000 ed il 5 gennaio 2001.

Nello specifico, il maggiore scalo londinese è caratterizzato da una fortissima domanda di slot nelle prime ore del giorno; in effetti, entro le ore 6-7 del mattino, sono usualmente programmati gli arrivi dei voli di lungo raggio. Questa notevole domanda d'uso si traduce in un considerevole costo associato agli slot di questa fascia oraria: nelle due tabelle seguenti sono riassunti alcune delle transazioni avvenute in questo aeroporto negli ultimi anni ed il costo medio indicativo di ogni coppia di slot secondo il responsabile del coordinamento di questi aeroporti, in funzione della fascia oraria considerata.

Anno	Vettori aerei (venditore – acquirente)		Costo	Caratteristiche della cessione
2003	British Airways	United Airlines	12 milioni di sterline	Cessione avvenuta attraverso un'asta
2004	Qantas	Flybe	20 milioni di sterline	2 coppie di slot
2008	Continental Airlines	GB Airways Air France Alitalia	209 milioni di dollari (110 milioni di sterline)	4 coppie di slot (due servizi quotidiani verso Newark e due verso Houston)
2008	Etihad	Luxair	9 milioni di sterline	Licenza temporanea per 5 anni

Fascia oraria	Costo medio indicativo (periodo pre-2011)
< 9 a.m.	30-40 milioni di sterline
9 a.m. – 1 p.m.	10 milioni di sterline
> 1 p.m.	N.D. (gli slot di questa fascia hanno un basso valore per i voli a lungo raggio)

Il vantaggio di assegnare gli slot attraverso il mercato secondario consiste nel rendere più efficiente l'utilizzo della limitata capacità aeroportuale; in effetti, rispetto all'assegnazione *amministrativa*, il maggior dispendio di risorse a cui sono soggette per l'acquisizione degli slot costringe, di fatto, le compagnie aeree ad una maggiore efficienza (in termini, ad esempio, di una minore quantità di cancellazioni dei voli originariamente programmati o di maggiori dimensioni degli aeromobili utilizzati per l'espletamento del servizio). Purtroppo, dati i notevoli valori economici in gioco per ogni singolo slot, una conseguenza negativa della forte incidenza del mercato secondario è il progressivo *shift* da servizi di rotte di breve-medio raggio a voli di lungo raggio, i quali sono capaci di mantenere un rendimento economico di gran lunga superiore e, dunque, permettono di ammor-

tizzare meglio il notevole investimento che le compagnie aeree hanno dovuto sostenere inizialmente per l'acquisizione degli slot.

In merito alle compagnie aeree cc.dd. *new entrant*, alle quali è di norma riservato un trattamento agevolato nell'assegnazione degli slot contenuti nello *slot pool*, l'articolo 2(b) del Regolamento europeo fornisce la seguente definizione: sono definite come *new entrant* le compagnie aeree seguenti:

- i vettori che, nel caso in cui la loro richiesta di slot fosse accolta, si troverebbero ad essere beneficiari (per il giorno specifico della richiesta, e nell'aeroporto in questione) di un numero di slot inferiore a 5 (dunque, potrebbero svolgere solamente due servizi di andata e ritorno);
- i vettori che, nel caso in cui la loro richiesta di slot fosse accolta, si troverebbero ad essere beneficiari (per il giorno specifico della richiesta, e nell'aeroporto in questione) di un numero di slot inferiore a 5, per rotte all'interno dell'Unione europea in cui siano già operanti al massimo altri due vettori (dunque, come nel caso precedente, potrebbero svolgere solamente due servizi di andata e ritorno);
- i vettori che, nel caso in cui la loro richiesta di slot fosse accolta, si troverebbero ad essere beneficiari (per il giorno specifico della richiesta, e nell'aeroporto in questione) di un numero di slot inferiore a 5, per rotte verso un aeroporto regionale in cui non sia già operante alcun altro vettore (in analogia ai casi precedenti, potrebbero dunque svolgere solamente due servizi di andata e ritorno).

La priorità conseguente allo status di compagnia aerea *new entrant* viene concesso nel caso in cui il vettore soddisfi la prima parte della definizione ed uno dei due ultimi punti. In aggiunta, il regolamento richiede che la compagnia aerea *new entrant* non sia intestataria di una quantità maggiore del 4 per cento degli slot totali del singolo aeroporto, oppure del 5 per cento degli slot totali disponibili nel sistema aeroportuale di cui l'infrastruttura interessata dalla richiesta faccia parte. In conclusione, è da osservare che gli slot concessi in funzione dello status di *new entrant* sono soggetti a vincoli più stringenti rispetto agli slot concessi per via ordinaria; ad esempio, non possono essere ceduti ad altre compagnie dai vettori beneficiari per un periodo pari ad almeno due stagioni equivalenti successive.

Per quanto riguarda il mercato aereo statunitense, come ricordato più volte in precedenza, la quasi totalità degli aeroporti non è soggetta ad una stringente regolamentazione della capacità e non è prevista l'assegnazione di slot. Le compagnie aeree sono *tenute* a programmare i loro movimenti in modo tale da minimizzare i ritardi per i passeggeri e le inefficienze delle infrastrutture.

Attualmente, la Federal Aviation Administration (FAA) prevede una qualche forma di limitazione della capacità (ed una conseguente redistribuzione degli slot) solamente in quattro aeroporti⁸:

- l'aeroporto nazionale Reagan Washington, e
- i tre aeroporti principali dell'area della città di New York: gli aeroporti internazionali JFK e Newark e l'aeroporto LaGuardia.

In particolare, gli aeroporti elencati sono caratterizzati da una limitazione sul numero massimo di movimenti orari che possono essere svolti; una particolarità dell'aeroporto di Washington è l'imposizione di una c.d. *perimeter rule* che prevede l'impossibilità (a meno di eccezioni esplicitamente concesse per legge) di programmare voli con aeroporti distanti oltre 1250 miglia dall'aeroporto in questione (al riguardo, si veda la figura 2-6, fornita a fine sezione).

Nelle tabelle in figura 1-1 e 1-2, sono esemplificate l'evoluzione della normativa a partire dalla prima legge emessa dalla FAA (i.e. la legge con cui sono stati definiti gli aeroporti ad alta densità, *High Density Rule* del 1969) e le attuali condizioni di controllo a cui sono sottoposti gli aeroporti.

Al riguardo, grazie a studi sperimentali condotti dal Government Accountability Office degli Stati Uniti (GAO, 2012), si può ritenere che la regolamentazione che prevede il controllo degli slot permette sì la gestione efficiente dei livelli di congestione ma, allo stesso tempo, può essere fonte di perdita di capacità e di limitazione della competizione fra le compagnie aeree operanti nei contesti aeroportuali soggetti a controllo. Nel seguito vengono dunque delineate brevemente queste valutazioni.

È di tutta evidenza il positivo effetto di limitazione dei livelli di congestione che si è potuto raggiungere grazie all'imposizione di un controllo oggettivo ed esterno sul numero totale di voli programmabili dalle compagnie aeree. A dimostrazione di ciò, si può prendere a riferimento il periodo tra l'Ottobre 2000 e l'Aprile 2001 in cui, per ragioni normative, la limitazione venne sospesa all'aeroporto LaGuardia. Il numero degli aeromobili soggetti a ritardi superiori ai 15 minuti passò, in media, da 330 al giorno in Ottobre (quando non era attiva la limitazione) a 98 al giorno in Aprile (quando venne ripristinato il limite).

⁸ Originariamente, a partire dagli anni 60 del secolo scorso, gli aeroporti soggetti ad una regolamentazione della capacità erano cinque: l'aeroporto internazionale di Chicago O'Hare è uscito dal programma di coordinamento nel corso del 2002.

	Date	Reagan National	JFK	LaGuardia	Newark
1969	April 1969	High Density Rule implemented	High Density Rule implemented	High Density Rule implemented	High Density Rule implemented
1970	October 1970				High Density Rule suspended
	December 1981	1,000-mile limit for nonstop flights set			
1981	October 1985	1,250-mile limit for nonstop flights enacted			
1985	April 2000	Twelve beyond-perimeter slot exemptions authorized	High Density Rule to be phased out by January 1, 2007	High Density Rule to be phased out by January 1, 2007	
	December 2003	Twelve more beyond-perimeter slot exemptions authorized			
2000	August 2006			Congestion management rule proposed	
2003	January 2007		High Density Rule expired	High Density Rule expired Temporary controls implemented by FAA order	
	March 2008		Temporary controls implemented by FAA order		
2006	April 2008			Congestion management rule proposed (second round)	
2007	May 2008		Congestion management rule proposed		Congestion management rule proposed
2008	June 2008				Temporary controls implemented by FAA order
	October 2008		Congestion management rule effective December 2008	Congestion management rule effective December 2008	Congestion management rule effective December 2008
2009	October 2009		Congestion management rule rescinded	Congestion management rule rescinded	Congestion management rule rescinded
2010	April 2011		Temporary slot controls extended until a congestion management rule is effective or October 2013	Temporary slot controls extended until a congestion management rule is effective or October 2013	Temporary slot controls extended until a congestion management rule is effective or October 2013
2011	October 2011	Slots transfer between Delta Air Lines and US Airways at Reagan National and LaGuardia approved, with conditions (final application)		Slots transfer between Delta Air Lines and US Airways at Reagan National and LaGuardia approved, with conditions (final application)	
2012	February 2012	Eight more beyond-perimeter slot exemptions authorized and eight within-perimeter slots authorized to be converted to beyond perimeter slot exemptions			
	May 2012	Eight new beyond-perimeter slot exemptions awarded to airlines			

Figura 1-1: Evoluzione normativa degli aeroporti statunitensi sottoposti a controllo degli slot

[fonte: GAO, 2012]

Tuttavia, questo sistema di controllo comporta delle inefficienze nell'uso della capacità del sistema aeroportuale, a causa di un non-utilizzo di slot disponibili o di una loro sotto-utilizzazione.

I motivi che stanno alla base della perdita di capacità per non-utilizzazione sono tre:

- slot non assegnati,
- slot non programmati, e
- slot non operati.

Come evidenziato in figura 1-3, non tutti gli slot disponibili da un punto di vista teorico vengono effettivamente assegnati: si tratta per lo più, e salvo eccezioni, di slot collocati in fasce orarie poco appetibili per la maggior parte delle compagnie aeree (alla mattina, molto presto, oppure alla sera, molto tardi).

Table 1: Selected Slot Control Rule Provisions for the Four U.S. Slot-Controlled Airports				
	Reagan National	LaGuardia	JFK	Newark
Minimum slot usage requirement	80 percent	80 percent	80 percent	80 percent
Hours that airport is slot-controlled	All hours	6:00 a.m. to 9:59 p.m., Eastern Time, Monday – Friday and 12:00 p.m. to 9:59 p.m., Eastern Time, Sunday	6:00 a.m. to 10:59 p.m., Eastern Time, daily	6:00 a.m. to 10:59 p.m., Eastern Time, daily
Usage measured for...	All days over 2-month reporting period	All days over 2-month reporting period	Each day of the week over a scheduling season ^a	Each day of the week over a scheduling season ^a
Authorization to buy or sell slots	Allowed	Not authorized	Not authorized	Not authorized
Authorization to lease or trade slots	Allowed	Allowed	Allowed	Allowed

Figura 1-2: Attuali caratteristiche delle normative nei quattro aeroporti sottoposti a controllo degli slot

[fonte: GAO, 2012]

La seconda fonte di perdita di capacità tiene conto del fatto che non tutti gli slot assegnati alle compagnie aeree vengono effettivamente utilizzati per la programmazione di voli. In effetti, anche in ambito statunitense, le Autorità richiedono l'utilizzo di almeno l'ottanta per cento degli slot assegnati, ma non è imposto alcun requisito minimo sullo *scheduling* a cui debbano essere soggetti gli slot. Questa mancanza di vincoli ha un doppio effetto: oltre a rappresentare una perdita di capacità, rappresenta anche una fonte di disparità di trattamento tra le diverse compagnie aeree. Dal momento che non è richiesto un collegamento diretto tra gli slot ed i voli programmati, è evidente che le compagnie aeree beneficiarie di un numero molto elevato di slot per uno stesso periodo potrebbero *simulare* un effettivo uso di slot anche qualora esso non fosse effettivamente compiuto nella realtà. Ad esempio, per una compagnia aerea intestataria di 5 slot per uno stesso periodo di tempo (u-

sato per il calcolo del tasso minimo di utilizzazione), attraverso una rotazione degli slot dichiarati come utilizzati si potrebbe raggiungere l'obiettivo dell'ottanta per cento, anche procedendo ad una programmazione di 4 voli su 5 per ogni giorno di *scheduling* corrispondente. Tale comportamento, negativo ai fini di un efficace utilizzo della capacità, non è fortunatamente percorribile dalle compagnie aeree intestatarie di un limitato numero di slot.

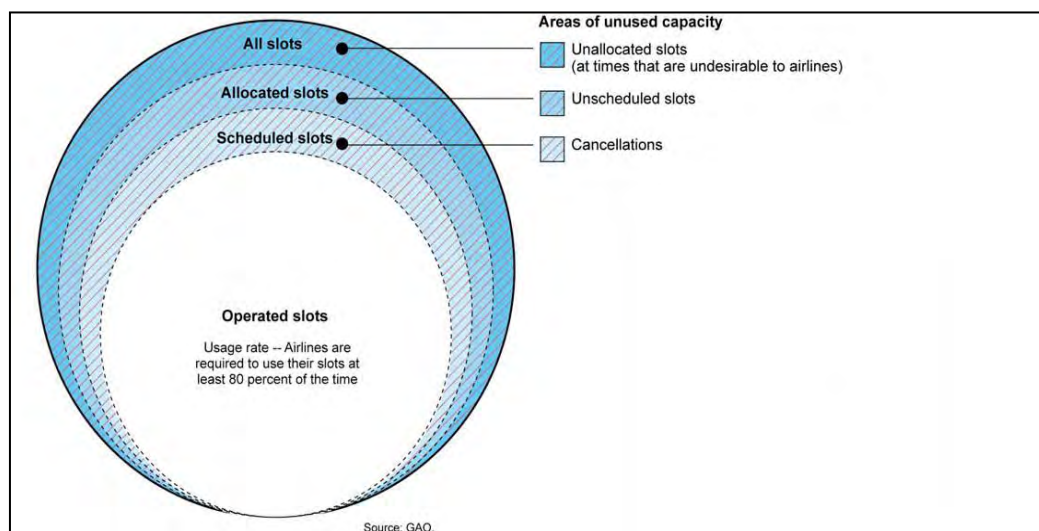


Figura 1-3: Definizione schematica della perdita di capacità per non-utilizzazione degli slot [fonte: GAO, 2012]

Una terza fonte di non utilizzazione della capacità è imputabile agli slot non operati; in effetti, in tale percentuale di slot (che deve necessariamente essere limitata al 20 per cento) dovrebbero essere inclusi tutti gli impedimenti all'operatività dovuti ad eventi accidentali e non prevedibili. Al fine di non perdere il mantenimento degli slot acquisiti, le compagnie aeree dovrebbero programmare una percentuale (ben) superiore al limite di legge dell'ottanta per cento in quanto, viceversa, rischierebbero il non soddisfacimento del requisito del minimo utilizzo anche a fronte di una limitata incidenza degli eventi imprevedibili.

Una perdita di capacità effettiva delle infrastrutture è dovuta ai cc.dd. slot sotto-utilizzati; anche in questo caso, i motivi sono tre:

- alte frequenze di voli tra le medesime destinazioni,
- bassi fattori di carico dei voli (ovvero, basso tasso di riempimento degli aeromobili), e infine
- ridotta dimensione degli aeromobili utilizzati.

In effetti, da analisi statistiche e confronti tra le serie di dati sulle operazioni svolte sia negli aeroporti soggetti a controllo sia in aeroporti analoghi per dimensione ma non

soggetti ad un controllo degli slot, si è visto che, ai fini del soddisfacimento del requisito dell'ottanta per cento, le compagnie aeree operano voli in quantità superiore a quello che le analisi di mobilità tra gli aeroporti farebbero pensare. Questo comportamento da parte delle compagnie aeree ha come scopo principale il mantenimento degli slot storicamente acquisiti; in effetti, come evidente anche dalla figura 1-5, l'incidenza delle compagnie aeree tradizionali (le cc.dd. *legacy airlines*) è percentualmente superiore – salvo eccezioni locali, come nell'aeroporto JFK – rispetto agli aeroporti non soggetti ad un'attività di coordinamento e di assegnazione degli slot.

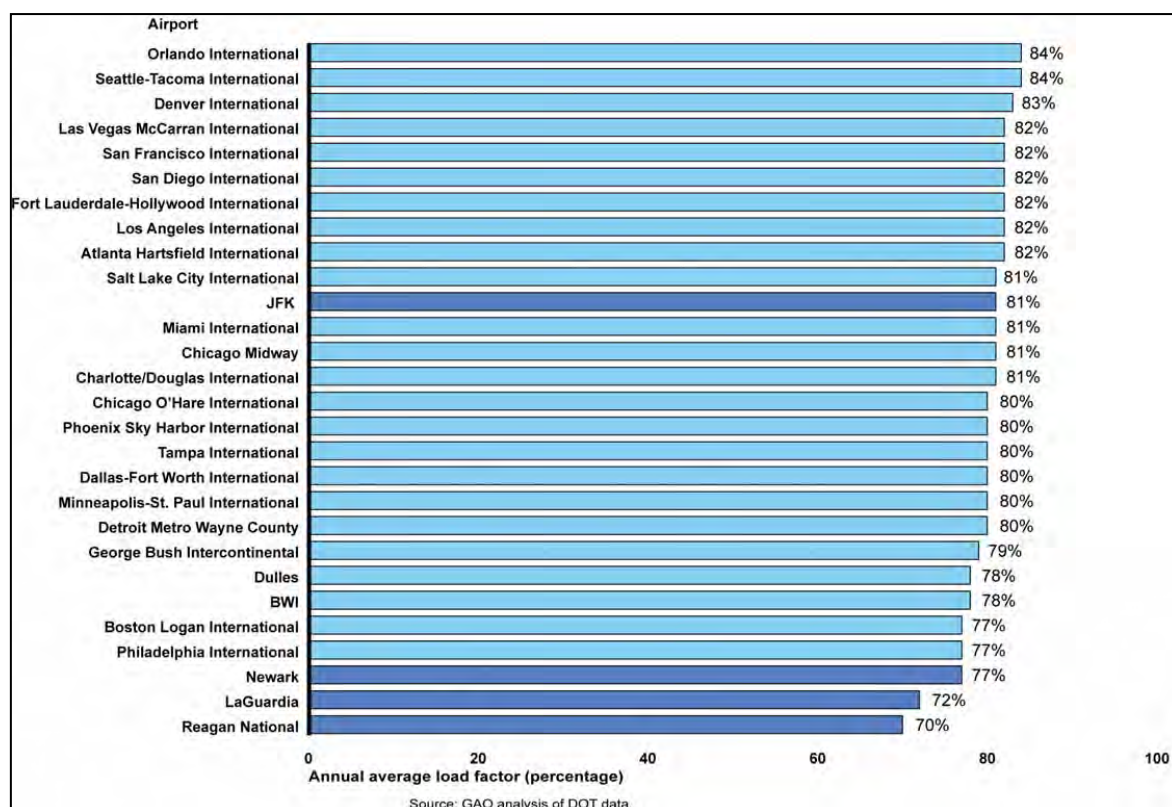


Figura 1-4: Analisi comparativa del fattore di riempimento degli aerei negli aeroporti soggetti/non soggetti al controllo degli slot [fonte: GAO, 2012]

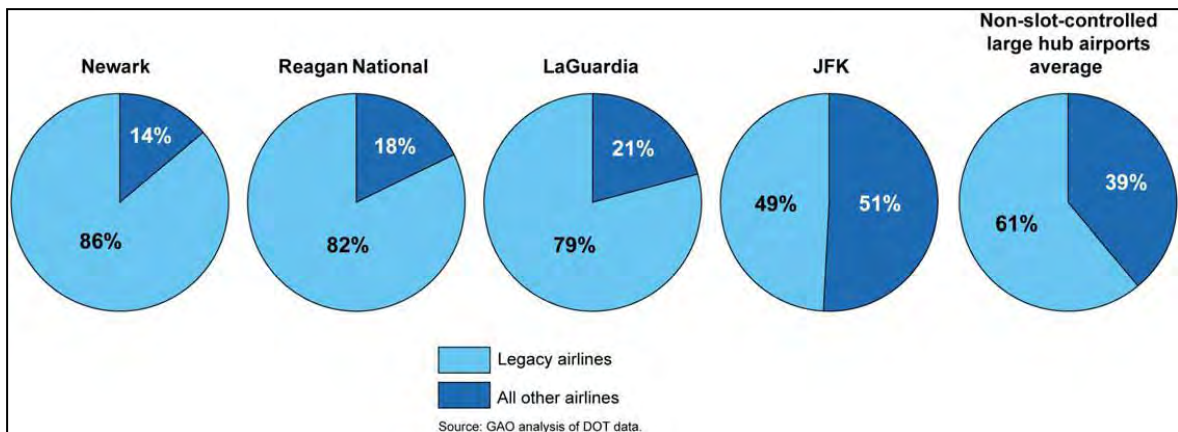


Figura 1-5: Incidenza delle compagnie aeree tradizionali negli aeroporti soggetti al controllo degli slot
[fonte: GAO, 2012]

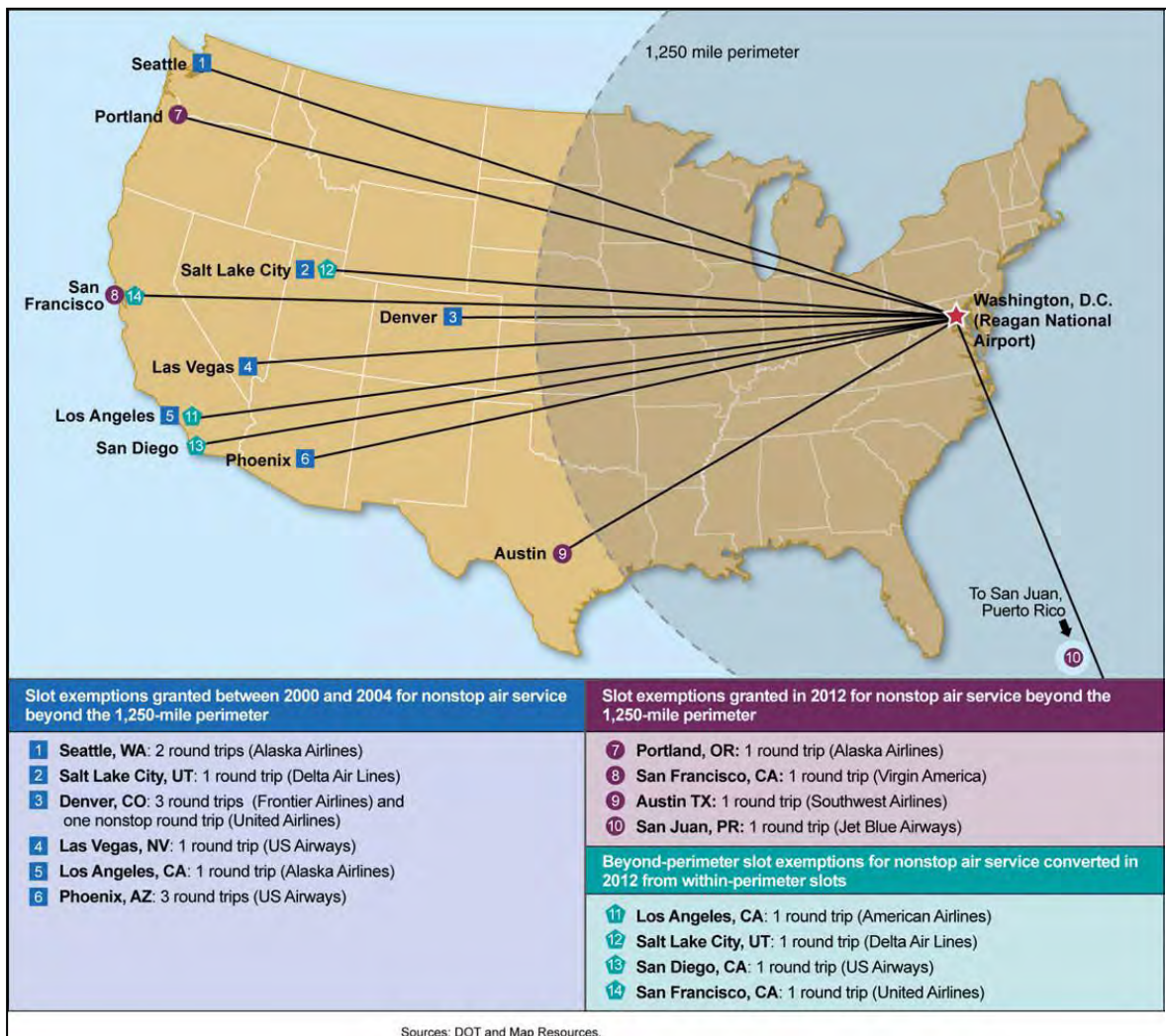


Figura 1-6: Eccezioni alla *perimeter rule* previste per l'aeroporto Reagan Washington National.
[fonte: GAO, 2012]

CAPITOLO 2

LA CAPACITÀ AEROPORTUALE

2.1 INTRODUZIONE

Lo studio della capacità aeroportuale può risultare un impegno non indifferente: un aeroporto è un sistema complesso in cui si interfacciano componenti di diversa natura e che, pur richiedendo impegni progettuali molto differenti tra loro, devono essere dimensionate mantenendo un equilibrio reciproco così da permettere un funzionamento bilanciato dell'intera infrastruttura.

In questo capitolo viene affrontato il problema della valutazione ed ottimizzazione della capacità del lato *airside* dell'infrastruttura, con particolare riguardo al suo elemento principale, la pista di volo (o *runway*). Vengono sintetizzati i principali strumenti attualmente disponibili per procedere ad una sua valutazione (in termini di linee guida e di modelli software) e vengono poi descritti alcuni modelli matematici che, seppur datati, rappresentano ancora oggi solide basi dei metodi più moderni. Segue una sezione in cui viene descritto un metodo utile all'ottimizzazione della capacità aeroportuale, successivamente applicato in un esempio numerico.

2.2 I FATTORI INTERNI ED ESTERNI CHE INCIDONO SULLA CAPACITÀ

La capacità di un aeroporto dipende principalmente dalla capacità dei due suoi più importanti sottosistemi, il sottosistema aerostazione passeggeri (*terminal*) ed il sottosistema relativo all'area operativa (il c.d. *airside*), costituito dall'insieme delle piste di volo, dalle piste di rullaggio e dalle aree di sosta dei velivoli. Altre infrastrutture aeroportuali come quelle di collegamento con la viabilità ordinaria o quelle di supporto/soccorso alla movimentazione aerea, tranne in casi specifici, non danno usualmente luogo ad evidenti limitazioni della capacità dell'infrastruttura complessivamente intesa.

Questo capitolo tratta specificamente il tema della valutazione della capacità dell'*airside*.

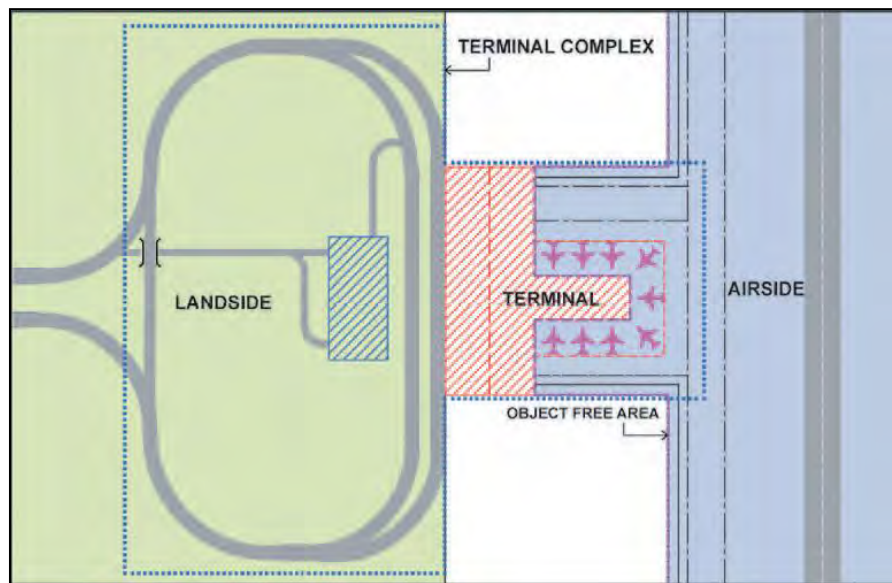


Figura 2-1: Le componenti principali di un aeroporto: le infrastrutture landside, l'area terminal e l'airside
[fonte: TRB, 2012]

Le componenti principali dell'airside che incidono sulla capacità sono cinque: le piste di volo, le vie di rullaggio, gli *holding bays*, i piazzali di stazionamento dei velivoli ed i *gates* di imbarco. Vediamone qualitativamente l'effetto sulla capacità.

Runways

Un aeroporto può essere dotato di pista di volo singola o di un sistema di piste di volo multiple; naturalmente notevole incidenza sulla capacità aeroportuale riveste il numero delle piste di volo presenti in un'infrastruttura, ma questo può non essere determinante; in effetti, un sistema a piste multiple può non contribuire ad un considerevole aumento della capacità se esse sono ad esempio intersecanti fra loro (configurazione a X, simmetrica o asimmetrica) oppure se sono disposte in una direzione non ottimale rispetto ai venti prevalenti).

Taxiways

Esistono tre principali tipologie di *taxiways*: le *taxiways* parallele alla pista di volo (per l'intera sua lunghezza o solo parzialmente), le *taxiways* di uscita/ingresso alla pista di volo, e le vie di rullaggio di collegamento ai piazzali.

Il numero, la localizzazione ed il layout globale del sistema di *runways* può incidere significativamente sulla capacità dell'infrastruttura: ad esempio, una *taxiway* parallela alla pista di volo principale ma non per la sua intera lunghezza può richiedere un maggiore tempo di occupazione della *runway* da parte degli aerei in decollo ed in atterraggio che so-

no dunque costretti a percorrerla interamente per raggiungere le testate di decollo o di fine atterraggio.

Nella letteratura di settore, l'insieme delle *taxiways* e delle *runways* è usualmente definito come l'area di movimentazione (*movement area*).

Holding bays/hold pads

Queste tipologie di infrastruttura hanno un'importanza sicuramente secondaria rispetto a quella della pista di volo ma una loro assenza può essere fonte di notevoli ritardi in particolari circostanze. Ad esempio, è consigliabile lo sviluppo di holding bays in prossimità delle testate della pista di volo per garantire comunque un passaggio nelle *taxiways* ad altri velivoli nel caso in cui la *runway* non sia libera per una partenza o, ad esempio, per permettere le eventuali operazioni di *de-icing* sugli aeromobili; inoltre, la collocazione di holding bays in prossimità dell'area terminale permette un loro utilizzo da parte di aeromobili in arrivo nel caso in cui tutti i piazzali di stazionamento o i gate di imbarco fossero momentaneamente indisponibili.

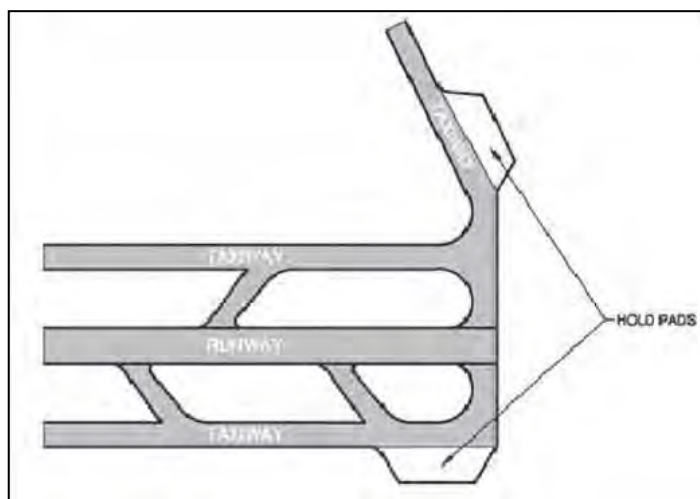


Figura 2-2: *Hold pads* [fonte: TRB, 2012]

Piazzali di stazionamento e gates di imbarco

Tipicamente questi due elementi sono progettati per servire più tipologie di aeromobili; possono influenzare la capacità dell'aeroporto se non sono stati dimensionati adeguatamente, in quanto costringono all'attesa gli aeromobili in arrivo che non dovessero trovare disponibilità.

La capacità aeroportuale è influenzata inoltre da molti fattori che non riguardano esclusivamente le sue infrastrutture fisiche: essi sono, ad esempio, la tipologia di aerei da servire, le procedure di sicurezza da rispettare e le condizioni meteorologiche prevalenti. Tali fattori vengono descritti nel seguito.

Tipologia di aerei

Gli aerei possono avere caratteristiche molto differenti fra loro in merito a diversi elementi: la loro dimensione, tipologia di motore (a getto o a turbina, ad esempio), categoria di performance (come la velocità di approccio alla pista o la durata di occupazione della pista) o di entità della turbolenza di scia prodotta. Tutte queste caratteristiche comportano che la tipologia di flotta di aerei da servire sia un parametro importante da valutare in quanto condiziona la capacità aeroportuale in merito a tre principali aspetti:

- *Criterio di separazione fra velivoli*: le procedure di sicurezza del sistema di controllo del traffico aereo sono generalmente basate sul peso degli aerei ed i requisiti da rispettare dipendono dalla differenza di dimensione tra l'aereo leader e quello che lo segue, prevedendo maggiori distanziamenti dietro aerei di grosse dimensioni. Questi requisiti sono anche strettamente collegati alla capacità di definire con precisione la posizione di un aeromobile in volo attraverso i sistemi di sorveglianza radar: maggiore è la loro precisione, meno stringenti sono i requisiti da far rispettare ai velivoli, in particolare in condizioni meteorologiche avverse.
- *Restrizioni all'uso delle piste di volo*: l'uso di una pista di volo può essere ristretto ad una particolare tipologia di aereo oppure ad una configurazione di utilizzo predefinita. Ad esempio, alcune infrastrutture possono essere destinate ad uso esclusivo di aerei di piccole dimensioni oppure possono permettere solo alcuni movimenti per ragioni di carattere ambientale o acustico.
- *Velocità di approccio finale*: la dimensione, il peso e la tipologia di motore di un aeromobile influenzano notevolmente la sua velocità tipica di approccio finale alla pista. Questa grandezza incide notevolmente sulla capacità aeroportuale in quanto velocità maggiori permettono volumi di traffico più elevati; inoltre, una drastica diminuzione della capacità viene causata da una spiccata differenziazione tra tipologie di aerei che si trovino ad utilizzare la pista in successione in quanto, per requisiti di sicurezza, il loro distanziamento reciproco deve aumentare con conseguente riduzione del volume di traffico gestibile.

La FAA prevede una classificazione delle diverse tipologie di aereo in base alle caratteristiche fisiche dei mezzi e alla velocità di approccio alla pista.

Aircraft Category	Approach Speed	Example
A	< 91 knots	Cessna 172
B	91 to < 121 knots	King Air 200
C	121 to < 141 knots	B-737
D	141 to < 166 knots	B-767
E	166 knots or more	SR-71

Figura 2-3 [fonte: TRB, 2012]

Aircraft Class	Description	Maximum Gross Takeoff Weight	Sample Aircraft
Small-S	Single engine	Less than 12,500 pounds	Cessna 172, Piper Warrior
Small-T	Twin engine	Less than 12,500 pounds	Beach 35, Piper Seneca, Turbo Commander
Small +	Mixed engines	Between 12,500 pounds and 41,000 pounds	Lear 35, Hawker 400, Citation 10
Large	Multiple engines	Between 41,000 pounds and 300,000 pounds	B-737, A319, Global Express, CRJ-200
B-757	Boeing 757	300,000 pounds	B-757
Heavy	Multiple engines	More than 300,000 pounds	B-747, B-767, B-777, A330
Super Heavy	A380	1,200,000 pounds	A380

Figura 2-4 [fonte: TRB, 2012]

Tipologia di attività schedulata

In funzione di come la capacità è definita, lo scheduling delle compagnie aeree può incidere o meno sul risultato finale. In effetti, quando la capacità è data in termini di funzione di ritardo medio per aeromobile, essa viene influenzata dall'eventuale presenza di picchi di domanda⁹. Viceversa, quando è definita in termini di volume di servizio annuale, sarà dipendente dai picchi di domanda come anche dalla stagionalità dell'aeroporto. Notevole influenza ha, ad esempio, l'attività di *hubbing* sugli aeroporti da parte di alcune compagnie.

Condizioni meteorologiche

Le condizioni meteorologiche influiscono notevolmente sull'uso delle piste di volo, sul loro orientamento e sui requisiti di separazione fra aeromobili. Ad esempio, una pronunciata variabilità della velocità dei venti a terra può costringere i piloti ad aumentare la velocità, che si riflette in maggiori lunghezze di pista richieste. In aggiunta, venti di particolare intensità secondo precise direzioni possono limitare l'uso delle piste disposte secon-

⁹ In questo caso, si fa riferimento alla definizione della capacità *pratica*, ovvero il massimo numero di operazioni che possono essere garantite dall'infrastruttura nel rispetto di un prefissato livello di servizio, espresso in termini di *valore del ritardo medio* (usualmente, 4-6 minuti).

do una data direzione e quindi possono limitare la capacità che potrebbe avere un sistema di piste multiple in condizioni non vincolate.

In merito alle condizioni di visibilità o altezza-nubi, la FAA definisce tre categorie:

- Visual flight rule (VFR): vale quando la visibilità è di almeno tre miglia e l'altezza-nubi (misurata alla base) pari ad almeno mille piedi;
- Instrumental flight rule (IFR): è valida quando la visibilità è almeno 1 miglio (ma inferiore a 3 miglia) e l'altezza-nubi compresa nell'intervallo 500-1000 piedi;
- Poor Visibility and Ceiling (PVC): quando le condizioni di visibilità e/o di altezza-nubi sono inferiori ai limiti minimi definiti per le condizioni IFR.

Questa distinzione in tre classi è importante in quanto, a parità di altre condizioni, qualora non siano valide le condizioni di approccio visuale VFR, possono essere effettuate meno operazioni e sono richiesti ulteriori criteri di sicurezza.

2.3 LA VALUTAZIONE DELLA CAPACITÀ SECONDO LA CIRCOLARE FAA (1995)

La valutazione della capacità aeroportuale è una fase molto importante nell'ambito dei più importanti lavori di pianificazione aeroportuale; purtroppo, nonostante molti attori del settore del trasporto aereo abbiano sviluppato e utilizzino propri strumenti atti a questa valutazione, dal punto di vista formale non esiste una consolidata letteratura di linee guida globalmente accettate. Ad esempio, Istituzioni internazionalmente riconosciute – come l'ICAO, l'Organizzazione Internazionale dell'Aviazione Civile – pur fornendo ampi strumenti utili ad una progettazione globalmente standardizzata delle infrastrutture aeroportuali, si limitano a fornire informazioni di carattere qualitativo in merito alla quantificazione della capacità delle stesse.

Su questo tema, in effetti, si fa ancora riferimento al pressoché unico documento ufficiale disponibile, la circolare pubblicata dalla FAA nel 1995: l'*Advisory Circular 150/5060-5 Airport capacity and Delay*, in cui vengono forniti strumenti di base per la valutazione della capacità aeroportuale e per il calcolo dei ritardi subiti dai velivoli in ambito aeroportuale. Tale documento è stato pubblicato per la prima volta nel 1968 e la sua versione attuale (la terza edizione) è ad oggi sotto revisione per l'aggiornamento di alcune sue parti.

La costante evoluzione dell'industria del trasporto aereo costringe ad un continuo aggiornamento degli strumenti di valutazione; si pensi, ad esempio, al confronto tra le tipo-

logie di aereo attualmente disponibili sul mercato rispetto alle pre-esistenti: negli ultimi tempi, l'introduzione di apparecchi dalle notevoli capacità interne – in termini di volumi di carico o di numero di passeggeri trasportabili, come l'Airbus A380 – ha comportato la necessità di notevoli miglioramenti infrastrutturali per gli aeroporti utilizzati da tali aeromobili (in termini di geometria delle piste, di tracciati planimetrici dei raccordi delle vie di rullaggio o di tipologie dei corridoi di carico telescopici da installare in corrispondenza dei gates aeroportuali, i cc.dd. *loading bridges* o *fingers*). Inoltre, la costante crescita della domanda di trasporto aereo (in particolare per le tratte a lungo raggio e con collegamenti verso Paesi dalle economie emergenti) ha costretto molti aeroporti ad una completa riprogettazione del loro layout, dando luogo a nuove configurazioni di piste di volo e di altre infrastrutture di supporto la cui complessità non trova più una corrispondenza adeguata nelle tipologie semplificate presenti nella Circolare a suo tempo. Tuttavia, dal momento che essa costituisce ancora un valido documento da prendere a riferimento si ritiene opportuno esaminare i punti principali.

Prima dei metodi di calcolo della capacità e dei ritardi, la Circolare fornisce il quadro generale e le definizioni delle grandezze in gioco.

La Circolare definisce la capacità aeroportuale in termini di *volume di traffico* che può essere sopportato; ovvero, essa è quantificata come il *massimo numero di movimenti aerei che possono essere sopportati dall'aeroporto e dalle sue componenti in un'ora*. In via teorica, dal momento che la capacità di una singola componente è indipendente da quella delle altre o da quella complessiva, essa potrà essere calcolata separatamente. In effetti, nonostante la Circolare si focalizzi principalmente sul calcolo della capacità delle *runway*, essa fornisce altresì degli strumenti per il calcolo della capacità di altri elementi dell'aeroporto, come le *taxyways* o i *gates* aeroportuali. Come già anticipato in precedenza, nonostante questa indipendenza di calcolo, le capacità delle diverse componenti dovranno comunque essere equilibrate tra loro; nella letteratura di settore, ad esempio, vengono utilizzati i cc.dd. *stoplight charts*¹⁰ in cui le capacità delle diverse componenti sono poste a confronto l'una con l'altra, così da identificare con facilità i punti critici e procedere ad un'efficace ri-progettazione.

¹⁰ Il termine *stoplight chart*, "grafico a semafori", indica la valutazione visiva, grazie all'utilizzo delle fasce di colore verde-giallo-rosso, dei livelli di capacità garantiti da ogni componente dell'infrastruttura aeroportuale (nell'esempio in figura 2.5, la capacità è espressa in totale-annuo-di-passeggeri).

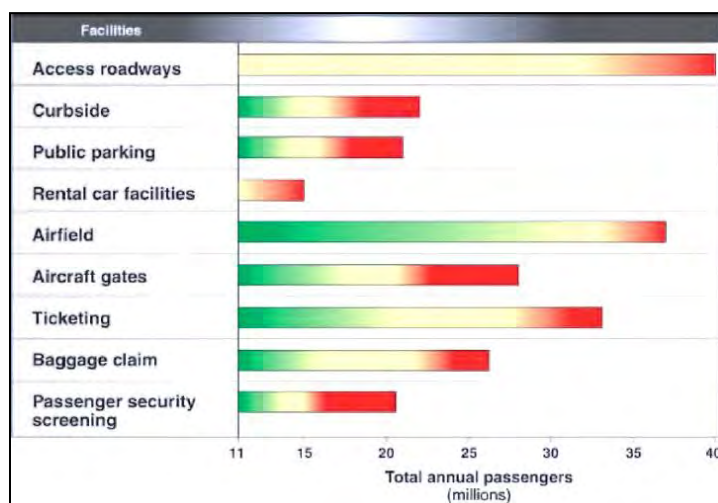


Figura 2-5: Esempio di *stoplight chart*, riferito alla capacità delle infrastrutture di un intero aeroporto
[fonte: TRB, 2012]

Il ritardo è definito come la differenza temporale fra l'istante in cui il movimento può essere portato a termine e quello in cui l'operazione si sarebbe compiuta se non fosse stata vincolata da un fattore esterno, letteralmente *“the difference between constrained and unconstrained operating time”*.

La Circolare si articola in cinque parti principali: nel capitolo 2 fornisce gli strumenti per il calcolo della capacità oraria di un aeroporto, del suo volume di servizio annuo (*Annual Service Volume, ASV*) e del ritardo subito dagli aeromobili per una serie di configurazioni di pista standard (nello specifico, sono forniti i dati per 19 configurazioni) per attività di progettazione di lungo periodo. Tuttavia, nell'ambito della stessa attività di progettazione, nel caso in cui sia necessario avere risultati più precisi oppure la situazione reale che si vuole analizzare non sia assimilabile a quella prevista nelle 19 configurazioni semplificate, si possono utilizzare le 43 configurazioni previste dal capitolo 3; nel capitolo 4 sono fornite indicazioni su specifiche situazioni aeroportuali, mentre nel capitolo 5 è contenuto un ristretto elenco dei software di calcolo disponibili all'epoca.

In via preliminare, va detto che negli esempi forniti di configurazione di utilizzo delle piste, la Circolare tiene sempre in considerazione il numero, la localizzazione, l'orientamento delle singole piste in uso, la tipologia e la direzione delle operazioni eseguite come pure le regole di volo (IFR, VFR o PVC) che sono vigenti nei diversi istanti.

La Circolare fornisce, per le 19 configurazioni previste, i valori delle capacità orarie, differenziandole a seconda delle condizioni VFR e IFR, ed *ipotizzando le utilizzazioni di pista(/e) che producono la più alta e sostenibile capacità, nel rispetto delle regole del*

controllo del traffico aereo e delle pratiche aeronautiche¹¹. I valori indicati sono dunque rappresentativi degli aeroporti aventi simili configurazioni d'uso delle piste e sono stati calcolati facendo delle importanti ipotesi:

- sulla configurazione di pista e sui movimenti che vi sono ammessi: il layout reale dell'aeroporto può essere efficacemente assimilato ad una delle 19 configurazioni; inoltre, più flussi di arrivo sono accettati esclusivamente su configurazioni che prevedano piste parallele;
- sulle taxiways: è ipotizzata una pista di rullaggio parallela alla runway per la sua intera estensione; inoltre, è assunta la presenza di vie di rullaggio di uscita rapida dalla pista di volo (le cc.dd. *rapid exit taxiways*) mentre non sono ammesse intersezioni con la pista di volo (i cc.dd. *taxiway crossings*);
- sulle limitazioni dello spazio aereo: non sono ammesse limitazioni;
- sulle strumentazioni a disposizione degli aeromobili: almeno una pista di volo è fornita di strumentazioni ILS e l'aeroporto è dotato delle necessarie infrastrutture per una movimentazione degli aeromobili secondo le prescrizioni di sicurezza;
- sulla percentuale degli arrivi e delle operazioni di *touch-and-go*¹²: si ipotizzano arrivi in numero pari alle partenze mentre le operazioni di *touch-and-go* sono definite sulla base di altri fattori (v. tabella riassuntiva).

Dunque, le ipotesi assunte dalla FAA per il calcolo delle grandezze relative alle 19 configurazioni-tipo sono riassumibili nella tabella seguente:

Mix Index	Percentuale di arrivi	Percentuale di operazioni <i>touch-and-go</i>	Rapporti di domanda	
			G	H
0-20	50 %	0-50	290	9
21-50	50 %	0-40	300	10
51-80	50 %	0-20	310	11
81-120	50 %	0	320	12
121-180	50 %	0	350	14

¹¹ Il termine sostenibile indica l'ipotesi secondo cui un livello di domanda al limite della capacità può essere mantenuto per un tempo limitato, non per un periodo di molte ore consecutive.

¹² Le cc.dd. operazioni *touch-and-go* sono usualmente associate a voli di addestramento, tipici degli aeroporti minori. Tendenzialmente, il numero di queste operazioni decresce all'aumentare delle operazioni condotte da aerolinee commerciali, all'avvicinarsi della domanda alla capacità della pista ed al deteriorarsi delle condizioni meteorologiche. Nelle tabelle e formule fornite dalla Circolare, la percentuale di operazioni *touch-and-go* è di solito associata ad un fattore amplificativo della capacità di pista; il motivo è facilmente spiegabile. L'operazione di *touch-and-go* prevede un atterraggio ed un immediato decollo del velivolo, senza un completo arresto dell'aeromobile; dal momento che questa combinazione atterraggio-decollo immediato comporta un perditempo pressoché nullo e viene comunque computata come due operazioni (la prima l'atterraggio, la seconda il decollo) ne risulta che un'alta percentuale di operazioni *touch-and-go*, di fatto, amplifica la capacità di pista. Questa definizione, pur non necessaria per il calcolo della capacità dei grandi aeroporti, è stata inclusa per completezza e maggiore comprensione delle formule generali.

dove:

- il *Mix Index* corrisponde alla seguente espressione matematica

$$Mix\ Index \stackrel{def}{=} \%(C + 3D)$$

ovvero, è pari alla somma tra la percentuale di aeromobili di categoria C ed il triplo della percentuale degli aeromobili di categoria D, dove le categorie di aereo sono espresse dalla seguente tabella:

Categoria di aereo	MTOW ¹³	Numero motori	Classificazione della turbolenza di scia
A	Fino a 12-500 lbs	Singolo	<i>Small</i> (S)
B		Multi	
C	12-500 – 300.000 lbs	Multi	<i>Large</i> (L)
D	Oltre 300.000 lbs	Multi	<i>Heavy</i> (H)

- il termine G è definito come il rapporto fra la domanda annua e la domanda giornaliera media del mese di punta (quest'ultima definita dall'acronimo ADPM-*Average Day, Peak Month demand*): questo fattore mira a tenere conto della variazione che la domanda subisce nel corso dell'anno: valori vicini a 365 indicano che tutti i mesi dell'anno hanno la stessa domanda; viceversa, valori molto bassi di G (ad esempio, inferiori a 300) stanno ad indicare picchi di stagionalità tipici di aeroporti a forte vocazione turistica¹⁴;
- il termine H è invece dato dal rapporto fra la domanda ADPM e la domanda media dell'ora di punta del giorno medio del mese di punta; questo fattore dà indicazioni sulla variabilità oraria della domanda durante il giorno: valori alti di H indicano che tutte le ore del giorno hanno livelli di domanda comparabili, mentre suoi valori bassi (ad esempio, inferiori a 12) indicano che i picchi di domanda sono propri solo di alcune ore del giorno.

Per le stesse 19 configurazioni di pista, la Circolare fornisce anche il valore del volume di servizio annuo, il quale è assimilabile ad una ragionevole stima della capacità annua dell'aeroporto. Esso deve tenere conto delle differenze di *utilizzo delle piste, della tipologia di aerei, delle condizioni meteo e delle procedure di sicurezza* che possono realizzarsi durante il corso dell'anno.

¹³ MTOW è l'acronimo di Maximum Takeoff Weight, ovvero il Peso Massimo dell'aeromobile al decollo.

¹⁴ Tale valutazione non è fine a se stessa: si pensi ad esempio all'importanza della stagionalità per la definizione del livello di coordinamento di un aeroporto vista nel precedente capitolo (aeroporti coordinati su base annuale o solo per la stagione estiva o invernale). Queste indicazioni quantitative sono fornite in [TRB, 2012].

I valori dell'ASV sono stati calcolati sulla base di ipotesi aggiuntive alle precedenti, che rimangono comunque valide anche per questo computo:

- Le condizioni meteorologiche che sono tali da garantire operazioni secondo le regole di approccio visuale si verificano *approssimativamente* per il 10 per cento del tempo totale;
- L'aeroporto opera *approssimativamente* per l'ottanta per cento del tempo totale con la configurazione d'uso delle piste che è in grado di produrre la più grande capacità oraria (ovvero, il valore indicato in normativa come la capacità oraria della specifica configurazione di pista).

Nella schematizzazione delle configurazioni, la Circolare si preoccupa di dare ulteriori precisazioni, non trascurabili:

- Le frecce indicate nella configurazione indicano il verso delle operazioni considerate (se di arrivo o di partenza) sulla specifica pista di volo (ove non sia indicata, sta ad indicare che la scelta della direzione non è discriminante ai fini del calcolo delle grandezze in gioco),
- Le configurazioni a piste non parallele fra loro hanno un limite sul valore dell'angolo di concorrenza,
- Per aeroporti con tre o 4 orientamenti di pista (layout elaborati), vanno utilizzati i due che sono utilizzati più frequentemente nell'operatività tipica dell'aeroporto.

Date queste ipotesi, i valori della capacità oraria e dell'ASV sono immediatamente ottenibili dalla consultazione delle tabelle fornite dalla Circolare una volta che sia stato calcolato il Mix Index specifico del contesto che si vuole analizzare. In figura 2-6 sono sintetizzati alcuni esempi dei valori di capacità e ASV forniti.

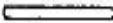
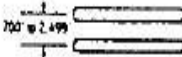
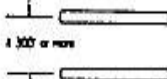
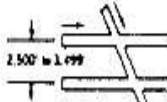


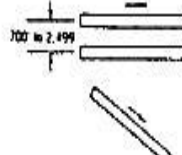
Configuration	Runway Configuration Diagram	Mix Index— Percent (C+3D)	Hourly Capacity (Operations per Hour)		Annual Service Volume (Operations per Year)
			VFR	IFR	
A Single Runway		0-20	98	59	230,000
		21-50	74	37	195,000
		51-80	63	36	205,000
		81-120	55	33	210,000
		121-180	51	30	240,000
B Dual Lane Runways		0-20	197	59	355,000
		21-50	145	37	275,000
		51-80	121	36	260,000
		81-120	105	39	285,000
		121-180	94	60	340,000
C Independent IFR Parallels		0-20	197	119	370,000
		21-50	149	114	320,000
		51-80	126	111	305,000
		81-120	111	105	315,000
		121-180	103	99	370,000
D Parallels plus Crosswind Runway		0-20	197	62	355,000
		21-50	149	63	285,000
		51-80	126	65	275,000
		81-120	111	70	300,000
		121-180	103	75	365,000
E Four Parallels		0-20	394	119	715,000
		21-50	290	114	550,000
		51-80	242	111	515,000
		81-120	210	117	565,000
		121-180	189	120	675,000
F Open V Runways		0-20	150	59	270,000
		21-50	108	57	225,000
		51-80	85	36	220,000
		81-120	77	39	225,000
		121-180	73	60	265,000
G Parallels plus Crosswind Runway		0-20	295	59	385,000
		21-50	210	57	305,000
		51-80	164	56	275,000
		81-120	146	59	300,000
		121-180	129	60	355,000

Figura 2-6: Esempi di capacità oraria (VFR/IFR) e ASV [fonte: La Franca, Castelluccio, Cappelli, 2008]

In ambito aeroportuale, il livello di servizio fornito dall'infrastruttura si calcola in funzione del ritardo medio subito dagli aerei nel corso dell'anno. In particolare, il ritardo medio permette di definire indirettamente la c.d. *capacità pratica* dell'aeroporto: secondo la FAA, "tradizionalmente, da 4 a 6 minuti di ritardo medio nell'anno per operazione sono

tenuti in conto per il calcolo dell'ASV e questo può essere considerato un livello accettabile di ritardo. Quando il ritardo medio giornaliero delle operazioni aeroportuali raggiunge i 4-6 minuti, l'aeroporto si sta avvicinando alla sua capacità pratica e può essere considerato generalmente come congestionato" [fonte: TRB, 2012].

In effetti, in un suo studio sottoposto al Congresso USA nel 1995, il Dipartimento Federale dei Trasporti (U.S. DOT) ha esplicitamente dichiarato¹⁵ che "non esistono criteri definiti per distinguere tra ritardi accettabili e non accettabili". Negli studi di valutazione di ipotesi di intervento infrastrutturale in ambito aeroportuale, si possono utilizzare grafici in cui viene rappresentata la relazione esistente fra domanda annuale e ritardo medio subito dagli aeromobili e, al contempo, si può definire il concetto di Volume di traffico massimo che un'infrastruttura può supportare in funzione di determinate soglie di ritardo: in figura 2-7, ad esempio, sono indicati in diverso colore i livelli di ritardo medio considerati accettabili o non accettabili da confrontarsi con i valori che risultano dalla valutazione dei volumi di operazioni a cui è soggetto l'aeroporto combinati con gli interventi ipotizzati.

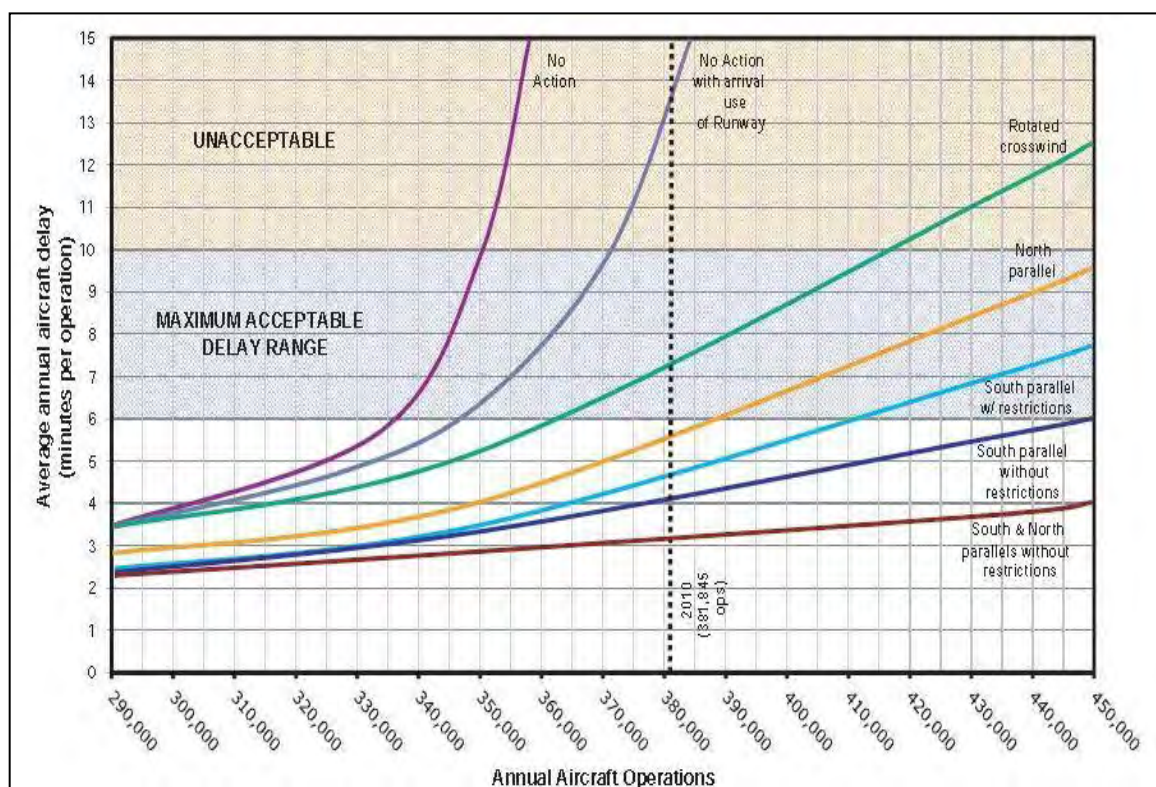


Figura 2-7: Curve di ritardo medio per aeromobile (confronto fra domanda, ipotesi di intervento e soglia ritardi massimi) [fonte: TRB, 2012]

¹⁵ [fonte: TRB - ACRP Report 79, pag. 95; 2012]

In assenza di indicazioni precise di criteri di accettabilità dei ritardi, è stata fornita nello stesso studio del 1995, una *scala dei livelli servizio* in cui si descrivono i ritardi medi che possono essere accettati o tollerati:

- *Da 4 a 6 minuti di ritardo per operazione*: operazioni complessivamente poco efficienti: vi sono limitati ritardi durante i periodi di picco in condizioni VFR e ritardi più consistenti con regole IFR, sia in presenza di condizioni meteorologiche moderate che estreme;
- *Da 6 a 8 minuti di ritardo per operazione*: aumentano i ritardi nei periodi di picco in condizioni VFR; aumentano i ritardi e cala l'affidabilità delle operazioni in condizioni IFR; c'è un'alta sensibilità ad eventi operativi accidentali;
- *Da 8 a 10 minuti di ritardo per operazione*: aumentano i ritardi nelle ore di picco in condizioni VFR, con conseguenze anche nelle ore vicine; risultano sostanziosi ritardi in condizioni IFR anche con cancellazioni di voli;
- *Oltre i 10 minuti di ritardo per operazione*: le operazioni in VFR sono soggette a ritardi sempre più consistenti con conseguenze sui periodi vicini; ritardi molto alti in condizioni IFR, che risultano in frequenti cancellazioni di voli.

Vediamo ora come la Circolare consenta di ottenere un valore per il ritardo totale annuo e per il ritardo medio subito dagli aerei (rif. paragrafo 2-5 della Circolare).

Va stimata la domanda annua *in atto* o sulla base di *serie storiche* o ottenuta attraverso *proiezioni* per traffico futuro.

Si calcola il rapporto fra la domanda ottenuta e il volume ASV, ottenendo un rapporto da usare come dato di ingresso nel grafico fornito (sull'asse delle ascisse), e da cui si ottiene il valore corrispondente di ritardo medio (sull'asse delle coordinate; v. figura 2-8). Nel grafico si vede una fascia, la cui parte superiore è valida per aeroporti in cui predominano le operazioni di compagnie aeree (l'aviazione commerciale, *air carrier operations*) mentre l'intera fascia può applicarsi per aeroporti in cui sono importanti le operazioni di aviazione generale. È da sottolineare come la stessa Circolare affermi esplicitamente che singoli aerei potrebbero subire comunque ritardi di entità anche pari a 5-10 volte il ritardo medio indicato.

Il ritardo totale annuo dell'aeroporto è ottenuto dal prodotto fra il ritardo medio subito dagli aeromobili e il livello di domanda annua.

Segue il grafico di cui sopra.

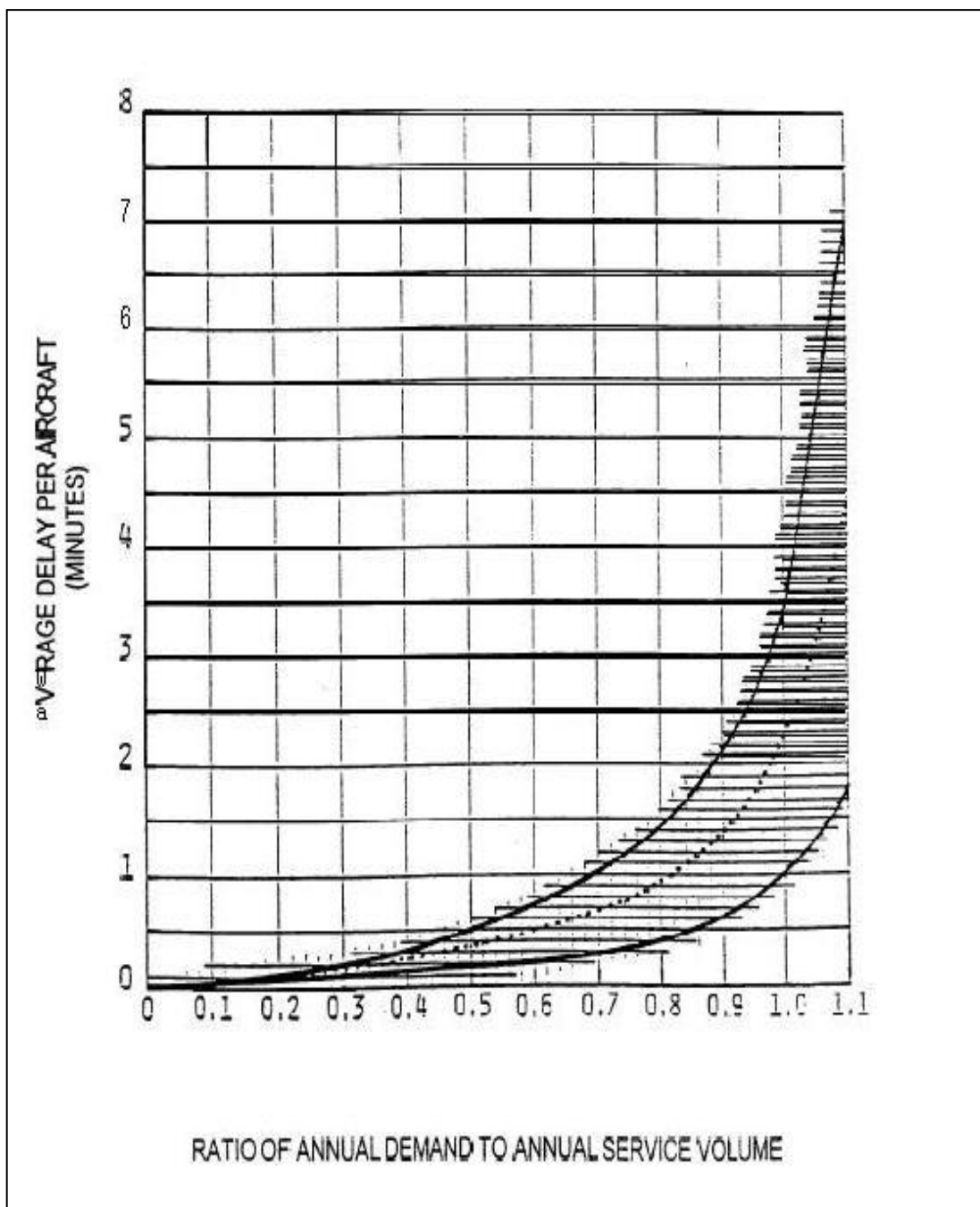


Figura 2-8: Ritardo medio per aereo al variare del rapporto tra domanda annua e ASV

[fonte: AC 150/5060-5, fig. 2-2]

Nel capitolo 3 la Circolare fornisce ulteriori strumenti per un calcolo più approfondito delle capacità aeroportuali, degli ASV e dei ritardi, per un più ampio ventaglio di configurazioni.

In particolare, permette di ottenere:

- La capacità oraria della componente *runway*,
- La capacità oraria della componente *taxiway*,

- La capacità oraria dell'insieme dei gates aeroportuali,
- La capacità oraria dell'aeroporto nel suo complesso,
- L'ASV, ed infine
- Il ritardo orario, giornaliero ed annuale.

Gli input ed output degli strumenti forniti in questo capitolo sono riassunti nella tabella seguente.

	Output	Input
1.	La capacità oraria della componente <i>runway</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Condizioni meteorologiche (VFR, IFR, PVC), - Configurazione d'uso delle <i>runways</i>, - Mix Index, - Percentuale arrivi e operazioni <i>touch-and-go</i>, - Localizzazione uscite in <i>taxiway</i>
2-	La capacità oraria della componente <i>taxiway</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Localizzazione intersezioni <i>taxiway</i>, - Tasso di operazioni sulla <i>runway</i>, - Mix Index della <i>runway</i> incrociata
3.	La capacità oraria dell'insieme dei <i>gates</i> aeroportuali	<ul style="list-style-type: none"> - Numero e tipologia di gates, - Gate mix, - Tempi di occupazione gate
4.	La capacità oraria dell'aeroporto nel suo complesso	<ul style="list-style-type: none"> - Capacità delle tre componenti
5.	Il volume ASV	<ul style="list-style-type: none"> - Capacità orarie della componente-<i>runway</i>, - Frequenze delle condizioni di operatività
6.	Il ritardo orario	<ul style="list-style-type: none"> - Domanda oraria, - Capacità oraria della <i>runway</i>, - Fattore del profilo di domanda
7.	Il ritardo giornaliero	<ul style="list-style-type: none"> - Ritardo orario, - Domanda oraria, - Capacità oraria
8.	Il ritardo annuale	<ul style="list-style-type: none"> - Domanda annuale, - Ritardo giornaliero, - Domanda oraria, - Capacità orarie, - Percentuale condizioni VFR/IFR, - Configurazione d'uso delle piste

In relazione agli output che si vogliono ottenere, si fanno le seguenti osservazioni:

- *Sul calcolo della capacità oraria della componente runway:*
 - Tra le configurazioni disponibili (in totale, 43) va selezionata quella che rappresenta meglio la configurazione d'uso dell'aeroporto *durante le ore di interesse*;
 - determinando il Mix Index, le percentuali di arrivi e delle operazioni *touch-and-go* (con il relativo fattore T), studiando la localizzazione dell'uscita nella *taxiway* (ed ottenendo il suo fattore E), dallo studio del grafico relativo alla combinazione di queste caratteristiche si ottiene la capacità base oraria C^* che serve per determinare la grandezza richiesta, pari a:

$$\text{Capacità oraria componente_runway} = C^* \cdot T \cdot E$$

Segue un esempio dei grafici da utilizzare in questo calcolo.

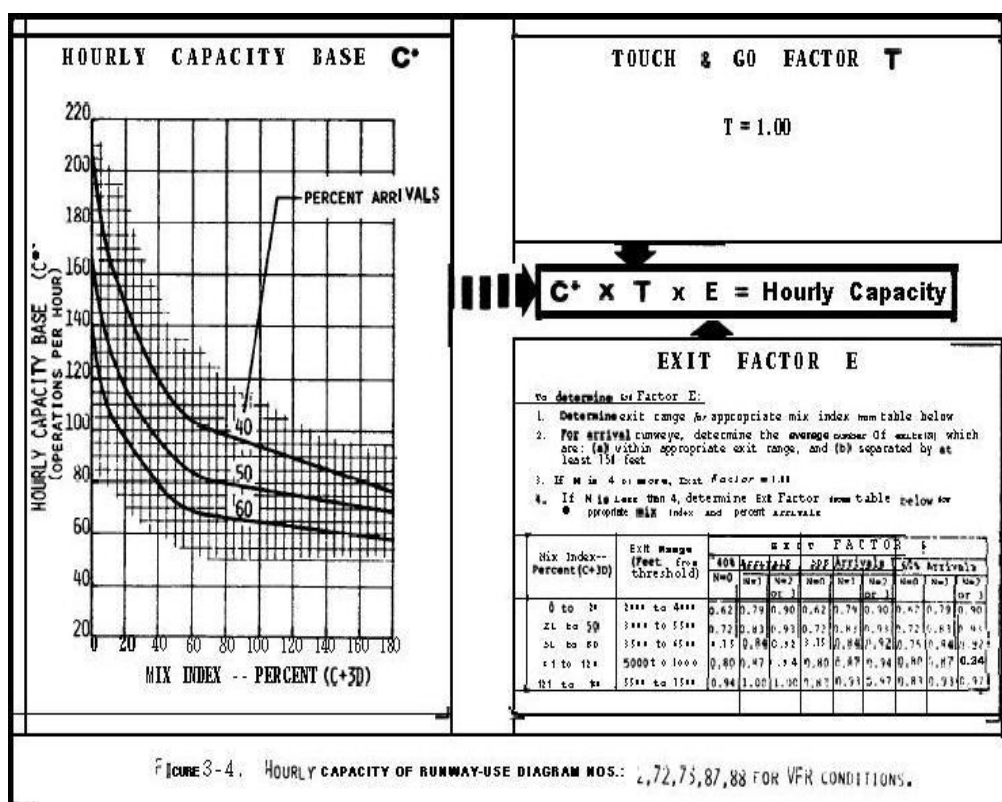


Figura 2-9: Esempio grafico [fonte: AC 150/5060-5]

- Sul calcolo del volume di servizio annuo:
- Si calcola il valore di ASV dalla relazione:

$$ASV = C_W \cdot G \cdot H$$

Dove, C_W rappresenta la capacità oraria pesata in base a vari fattori, tra cui la configurazione d'uso delle piste, G e H sono i coefficienti già definiti in precedenza.

Nel capitolo 4, la Circolare fornisce informazioni su alcune specifiche applicazioni riguardanti:

- il calcolo della capacità oraria della *runway* in condizioni meteorologiche PVC;
- le valutazioni da compiere nel caso di piste di volo prive di copertura radar¹⁶ o di strumentazione *Instrumental Landing System* (ILS), e di configurazioni di aeroporti

¹⁶ In via generale, va notato che l'assenza di radar, ancorché fatto non-frequente o atipico dei grandi aeroporti, può avere conseguenze molto significative sulla capacità: con la mancanza di copertura radar, i controllori del traffico aereo non possono utilizzare le separazioni originariamente previste per i movimenti di aerei in partenza o in arrivo. In queste con-

in cui una pista sia dedicata esclusivamente a velivoli di classe A e B (con due possibilità: pista singola ad essi dedicata oppure una pista riservata in un layout complessivo costituito da due piste parallele).

Inoltre, come ulteriore situazione pratica particolare, viene descritto il caso di due piste di volo parallele con soglia-pista sfalsata tra loro; lo descriviamo, dopo aver fatto una breve premessa sulle regole di volo generali in caso di *runways* parallele.

Esiste una regolamentazione molto stringente della FAA sui distanziamenti tra velivoli in movimento da/verso due piste parallele fra loro¹⁷; l'elemento che differenzia le situazioni-limite è costituito dalla distanza fra gli assi delle *runways* (i cc.dd. assi-pista). Le diverse situazioni sono descritte nella tabella seguente.

Distanza fra i due assi-pista	Procedure attive e requisiti
Da 700 a 2500 piedi (piste molto ravvicinate)	<ul style="list-style-type: none"> - approcci indipendenti se in VFR, con procedure di annullamento delle turbolenze di scia - ammesso singolo flusso in IFR
Da 2500 a 3000/3400/4300 piedi (piste ravvicinate)	<ul style="list-style-type: none"> - arrivi dipendenti (sfalsati di 1,5 miglia nautica) con approcci ILS - partenze indipendenti - arrivi e partenze indipendenti
Maggiore di 3000/3400/4300 piedi (piste lontane)	<ul style="list-style-type: none"> - arrivi simultanei indipendenti con ILS - richieste particolari strumentazioni
Maggiore di 5000 piedi (piste lontane)	<ul style="list-style-type: none"> - triplo approccio simultaneo con ILS
Maggiore di 9000 piedi (piste molto distanziate)	<ul style="list-style-type: none"> - approcci simultanei con ILS senza controllo finale

Dunque, simultanei arrivi su una pista e partenze sull'altra sono indipendenti a partire da un distanziamento pari a 2500 piedi. Per piste parallele con soglia pista sfalsata il requisito di distanziamento tra gli assi-pista che indica l'indipendenza dei due movimenti dipende dall'entità e dalla direzione dello sfalsamento.

Lo sfalsamento può essere favorevole (caso 1) e sfavorevole (caso 2):

- Il caso 1 si verifica quando l'arrivo avviene sulla soglia pista più vicina (e la partenza è sull'altra pista): in questo caso, il distanziamento fra assi-pista decresce di

dizioni, ad esempio, si utilizzano particolari procedure di separazione ATC al posto della separazione radar (con limiti più stringenti come, ad esempio, la c.d. *one-in one-out rule*) o regole basate su una separazione su base-temporale (e.g. un'imposizione di 10 minuti tra due successivi atterraggi), che si traducono in notevolissimi incrementi dei distanziamenti temporali e/o spaziali fra successive operazioni, con conseguente drastica caduta della capacità effettiva dell'aeroporto.

¹⁷ In questo paragrafo si fa riferimento alle più recenti normative FAA, entrambe pubblicate nel 2012, ovvero: FAA Order JO 7110.65 *Air Traffic Control*, 2012; FAA Notice JO 7210.33, *Simultaneous Widely Spaced Parallel Operations*, 2012. In ambito italiano, norme di riferimento sono i Compendi pubblicati dall'ENAV, Ente Nazionale Assistenza al Volo, ovvero il Compendio 77-155 ed il Compendio 643-736.

100 piedi per ogni 500 piedi di sfalsamento longitudinale, fino ad un limite minimo di 1000 piedi;

- Il caso 2 si verifica, all'opposto, quando il velivolo in arrivo approccia la pista con la soglia più lontana nel suo percorso di avvicinamento all'aeroporto: in questa seconda situazione, il requisito di 2500 piedi fra assi-pista va incrementato di 100 piedi per ogni 500 piedi di sfalsamento longitudinale.

Quando questi requisiti tra gli assi-pista sono soddisfatti, arrivi e partenze possono essere assunte come indipendenti in condizioni di volo IFR.

Nelle figure 2-10 e 2-11 sono esemplificati i due casi descritti.

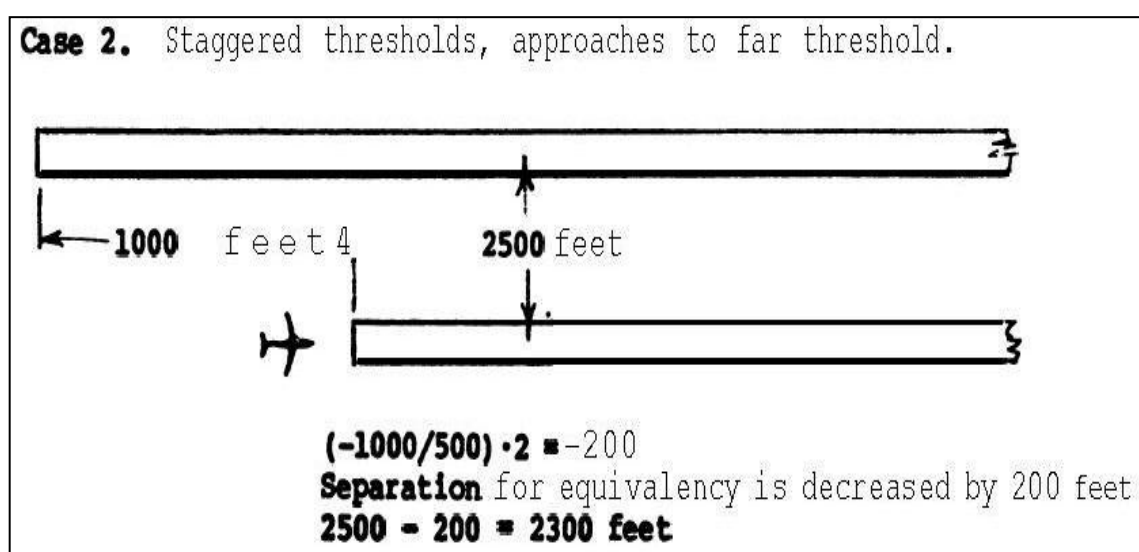
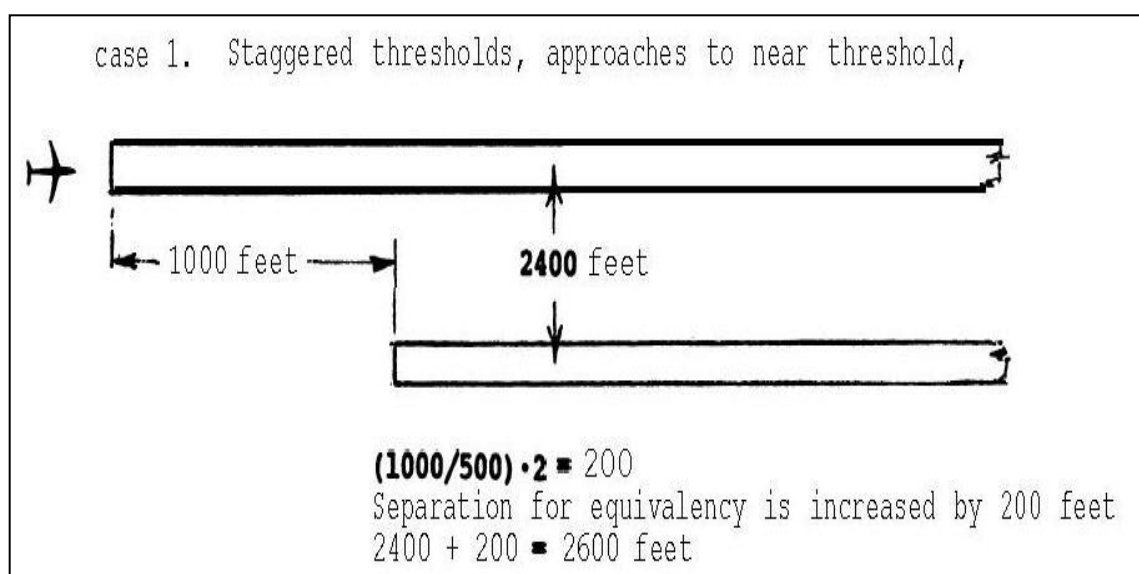


Figura 2-10: Esempi grafici di *runways* parallele con soglie sfalsate [fonte: AC 150/5060-5]

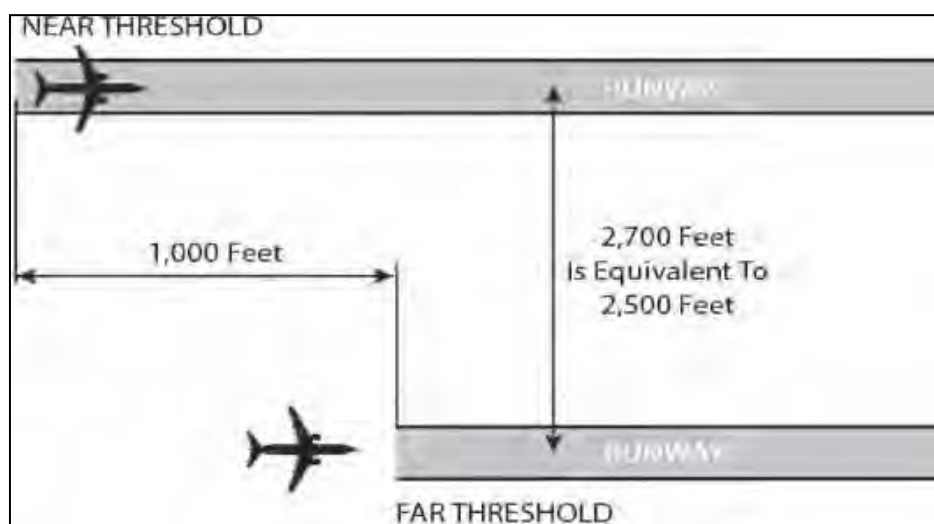
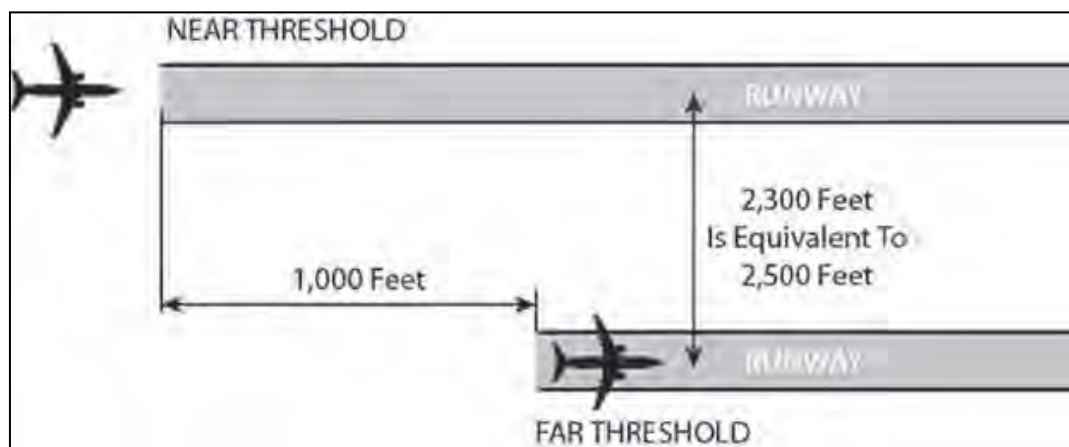


Figura 2-11: Esempi grafici di calcolo delle distanze equivalenti di *runways* parallele con soglie sfalsate
[fonte: TRB, 2012]

2.4 I SOFTWARE PER LA VALUTAZIONE DELLA CAPACITÀ

Nella Circolare FAA descritta nella sezione precedente, un capitolo (il quinto) è dedicato ai software che permettono il calcolo della capacità aeroportuale e dei ritardi e che consentono di compiere ulteriori valutazioni quantitative sulle grandezze in gioco.

I modelli citati nel documento sono:

- *l'Airport and Airspace Simulation Model (SIMMOD)*: è un modello di simulazione usato dalla FAA¹⁸ e da molti operatori del settore per il progetto di interventi su infrastrutture esistenti, per il calcolo dei tempi di viaggio di un aereo e dei flussi ge-

¹⁸ È un software protetto da licenza; tuttavia, la sua versione base, denominata FAA SIMMOD, è disponibile gratuitamente dalla FAA.

stibili da un aeroporto (o da una sua componente); permette inoltre lo studio sia di piste singole che di un layout complesso come pure di un sistema elaborato di infrastrutture costituito da aeroporti multipli, in cui siano incluse problematiche relative ad incroci di rotte nello spazio aereo. È uno strumento di *valutazione* dal momento che permette la quantificazione della capacità, dei ritardi, dei tempi di viaggio ed anche dei consumi degli aeromobili. Inoltre, implementando al suo interno un altro modello (l'*Integrated Noise Model*, INM, della FAA) permette la valutazione dell'impatto acustico dei diversi progetti;

- l'*Airport Model*: è un modello di simulazione molto generale, utilizzabile per ogni aeroporto. Gli input richiesti includono i dati fisici del layout, le regole e procedure ATC e le caratteristiche e performance degli aeromobili. Permette l'inserimento dei valori in atto di domanda come pure la definizione di programmi di *scheduling* generati con casualità *di volta in volta* dal software. Tra le caratteristiche uniche del modello vi sono il dettaglio consentito per la modellazione della fase di decelerazione in atterraggio, della decelerazione e selezione dell'uscita prescelta dalla pista di volo, del distanziamento fra arrivi così da permettere gli attraversamenti della *runway* da parte di velivoli sulle cc.dd. *crossing taxiways*;
- l'*Airfield Delay Simulation Model* (ADSIM): è un modello di simulazione ad eventi discreti che permette di calcolare i tempi di viaggio, i ritardi ed i volumi di traffico. Il modello implementa la tecnica di campionamento secondo il metodo Monte Carlo: in effetti, il modello simula l'andamento del traffico aereo attraverso parametri probabilistici come il tempo di servizio ai *gate* o i distanziamenti fra velivoli in fase di atterraggio. Gli output, in termini di volumi orari, permettono di ottenere ulteriori indicatori di performance come i ritardi sulle diverse rotte o i tempi di viaggio.
- l'*Airfield Capacity Model*: è principalmente basato sulle teorie analitiche ed i modelli di base della capacità aeroportuale; permette il calcolo della massima capacità operativa di un sistema di *runway*, consentendo di variare *a discrezione dell'utente* i valori dei parametri da utilizzarsi nel calcolo (come il numero e l'utilizzo delle *runways*, le velocità del mix di aerei che utilizzano l'infrastruttura o le caratteristiche del sistema di controllo aereo). Sottintendendo le stesse ipotesi analitiche, esso rappresenta sostanzialmente la versione *software* dei metodi di calcolo descritti nel capitolo 3 della Circolare;
- La Circolare ammette anche un quinto modello, l'*Airport Design Computer Model*: esso è sostanzialmente la versione *software* del metodo di calcolo della capacità e

dei ritardi descritto al capitolo 2- Una volta prefissati il livello di domanda ed il valore del Mix Index, il modello restituisce come output il *ranking* delle configurazioni che soddisfano la domanda richiesta, in ordine di maggior capacità e di minore ritardo (normalmente, la configurazione che viene caratterizzata come la migliore è quella che prevede quattro *runways* parallele, variamente distanziate, disposte lungo la stessa direzione – configurazione 8; viceversa, la configurazione *peggiore* è evidentemente costituita dalla configurazione a pista singola – configurazione 1). Un esempio dei risultati prodotti dal modello è contenuto in figura 2-12-

AIRPORT CAPACITY AND DELAY DATA									
C = Percent of airplanes over 12,500 lbs but not over 300,000 lbs .								55	
D = Percent of airplanes over 300,000 lbs								4	
Mix Index (C+3D)								67	
Annual demand								220,000	
Air carrier operations dominate									
AIRPORT CAPACITY AND DELAY FOR LONG RANGE PLANNING									
Runway-use Configuration	Capacity		ASV	Ratio of Annual Demand to Asv	Average Delay per Aircraft		Minutes of Annual Delay		
(Sketch) No.	(Ops/Hour)			Ratio	(Minutes)		(000)		
	VFR	IFR			Low	High	Low	High	
8	242	111	515,000	0.43	0.3	0.4	66	88	
7	184	111	455,000	0.48	0.3	0.5	66	110	
4	126	111	305,000	0.72	0.7	1.1	154	242	
12	126	111	305,000	0.72	0.7	1.1	154	242	
6	184	65	290,000	0.76	0.8	1.2	176	264	
5	171	65	285,000	0.77	0.9	1.3	198	286	
3	126	65	275,000	0.80	1.0	1.5	220	330	
11	126	65	275,000	0.80	1.0	1.5	220	330	
16	164	56	275,000	0.80	1.0	1.5	220	330	
18	164	56	275,000	0.80	1.0	1.5	220	330	
19	158	56	275,000	0.80	1.0	1.5	220	330	
13	145	56	270,000	0.81	1.0	1.5	220	330	
2	121	56	260,000	0.85	1.1	1.7	242	374	
10	121	56	260,000	0.85	1.1	1.7	242	374	
17	121	56	260,000	0.85	1.1	1.7	242	374	
14	85	56	220,000	1.00	2.3	3.5	506	770	
15	82	56	215,000	1.02	2.6	4.0	572	880	
9	77	56	215,000	1.02	2.6	4.0	572	880	
1	63	56	205,000	1.07	3.6	5.7	792	1254	

Figura 2-12: Esempio di output del modello ADCM [fonte: AC 150-5060/5]

Fino a questo punto abbiamo ricordato i modelli menzionati nella Circolare, aggiornati evidentemente al suo periodo di pubblicazione. Oggigiorno, si possono distinguere

cinque livelli di modelli¹⁹ che riguardano il calcolo della capacità aeroportuale, corrispondenti ad altrettanti gradi di complessità:

1. *Metodi che fanno uso di tabelle*: un esempio è il calcolo della capacità secondo il capitolo 2 della Circolare;
2. *Metodi che fanno uso di grafici, nomogrammi e fogli di calcolo*: corrispondono al metodo di calcolo della capacità secondo il capitolo 3 della Circolare
3. *Modelli analitici per il calcolo della Capacità e dei Ritardi*: come anticipato, sono ad esempio alcuni dei programmi *software* descritti nel capitolo 5 della Circolare, i quali implementano i metodi di calcolo previsti al capitolo 3 della stessa Circolare (e.g. *Airport Design Capacity Model* o il *Runway Capacity Model LMI*);
4. *Modelli di simulazione per il calcolo della capacità*: sono strumenti ad elevato grado di dettaglio che valutano la capacità aeroportuale (e.g. il *Flexible Airport Simulation* FLAPS ed il *runwaysimulator* sviluppato dal MITRE²⁰); la particolarità del *runwaysimulator* deriva dal fatto che, pur essendo un modello di simulazione, è stato progettato mirando a fornire le stime delle capacità dell'*airfield* (ovvero, la sua massima capacità sostenibile) piuttosto che le stime dei ritardi degli aerei, nonostante i ritardi possano essere un suo output ulteriore. Dunque, rispetto ai modelli di simulazione, questo modello richiede l'inserimento di dati di input meno dettagliati, e di conseguenza permette la sua implementazione con una minore quantità di risorse.
5. *Modelli di simulazione dell'Airfield*: sono i *classici* modelli di simulazione che sono stati sviluppati per lo studio dei ritardi degli aeromobili (e.g. il SIMMOD, l'ADSIM, il RDSIM, il TAAM e l'*AirTop Fast Time Simulator*).

Procediamo ora ad una descrizione più dettagliata dei livelli di modello di cui si è accennato.

	Caratteristiche principali
Level 1	Permette la valutazione immediata della capacità, dei volumi di servizio annui e dei ritardi per configurazioni aeroportuali reali assimilabili a quelle fornite.
Level 2	Permette lo studio di una grande varietà di configurazioni, con diverse condizioni meteo, tenendo conto anche di fattori di punta del traffico (quando non è obbligatorio sondare dati reali si possono utilizzare quelli standard forniti dalla Circolare, tenendo conto della stagionalità).

¹⁹ [Fonte: TRB, 2012]

²⁰ Ente di ricerca e sviluppo, no-profit, legato al Governo americano.

Level 3	Consente solo l'analisi della capacità delle <i>runways</i> (tuttavia, le caratteristiche delle <i>taxiways</i> ed i vincoli dello spazio aereo limitrofo possano essere inglobati implicitamente nelle grandezze delle piste di volo analizzate).
Level 4	Permette di analizzare complessi sistemi di piste con regole ATC aggiornabili e vincoli potenziali sia fisici che di carattere ambientale.
Level 5	<p>Questi modelli rappresentano il grado più alto di complessità e sono stati sviluppati per valutare la capacità di pista e l'entità dei ritardi in uno stesso ambiente di modellazione. Storicamente, sono stati sviluppati per analizzare anche globalmente layout aeroportuali complessi e spazi aerei in cui molti fattori dovessero essere messi in relazione (configurazione di piste, strutture dei terminal, limitazioni dello spazio aereo o tipologia di operatività degli aeromobili).</p> <p>Questi modelli sono in grado di:</p> <ul style="list-style-type: none"> - rappresentare l'intera gamma di operazioni compiute dagli aeromobili, come il decollo, l'entrata o uscita dai <i>gates</i>, e l'atterraggio; - modellare le operazioni ai <i>gates</i> ed i movimenti sul sistema di <i>taxiway</i>, - utilizzare un sistema di reti per rappresentare le diverse configurazioni di infrastrutture a terra (<i>runway</i> e sistema di <i>taxiways</i>) e nello spazio aereo (rotte di avvicinamento ed allontanamento dall'aeroporto).

	Input e ipotesi del modello
Level 1	Bisogna scegliere la configurazione delle piste, dichiarare la tipologia aerei e stabilire le condizioni VFR o IFR.
Level 2	Va scelta la migliore rappresentazione delle condizioni meteorologiche (altezza-nubi e visibilità), della configurazione d'uso delle piste; vanno dichiarati il Mix Index, le percentuali di arrivi e di operazioni <i>touch-and-go</i> , i fattori di uscita dalla <i>runway</i> alla <i>taxiway</i> e le informazioni sulla <i>runway</i> (numero piste e loro localizzazione).
Level 3	Vanno stabiliti la configurazione delle <i>runways</i> , i tipi di operazioni (arrivi, partenze) assegnati ad ogni <i>runway</i> , il mix di aeromobili in ogni pista (il c.d. <i>fleet mix</i>), le performance caratteristiche degli aerei (il tempo di occupazione della pista ROT, la separazione minima richiesta tra Arrivi/Partenze, Arrivi/Arrivi e Partenze/Partenze, la velocità di approccio etc.), le regole e procedure ATC, i valori medi di separazione tra velivoli reali (questi valori sono considerati, analogamente al ROT, come variabili aleatorie e l'utente può decidere la deviazione standard e la media di queste grandezze, da cui gli intertempi di sicurezza fra operazioni (i cc.dd. <i>buffers</i>) sono stimati).
Level 4	Questi modelli possono tenere conto di nuove tecnologie e procedure di volo attraverso l'uso di parametri riguardanti: le operazioni degli aerei, i distanziamenti temporali di sicurezza, la dipendenza fra <i>runway</i> , i percorsi seguiti dagli aerei oppure i distanziamenti fra piste parallele. Tengono inoltre conto delle uscite/entrate in <i>taxiway</i> ; tuttavia non considerano aspetti specifici delle <i>taxiway</i> come incroci <i>runway/taxiway</i> o piste parallele di <i>taxiway</i> . In ogni caso, la mancanza/assenza di <i>taxiway</i> parallela può essere assunta implicita-

	<p>mente intervenendo sui tempi di occupazione della pista in arrivo (<i>Arrival Runway Occupancy Time</i>, AROT).</p> <p>Facendo riferimento al <i>runwaysimulator</i>, nella versione 2010 – è in aggiornamento – erano previste due possibilità per modellare il tempo di occupazione:</p> <ul style="list-style-type: none"> - seguire la traiettoria di atterraggio secondo un modello proprio di atterraggio-rullaggio ed incorporando parametri di performance come la velocità di <i>touchdown</i>, la decelerazione e la velocità di uscita, oppure - l'utente poteva definire un proprio tempo di occupazione e poi il modello avrebbe calcolato la traiettoria ed i vari parametri per poter avere quel valore di AROT. <p>Nella nuova versione (2012) il software potrà includere o meno la possibilità di localizzazione dell'uscita nella <i>taxiway</i>.</p> <p>Il <i>runwaysimulator</i> ha sei fonti di aleatorietà: generazione dei voli, tempi di occupazione della pista in arrivo, tempi di occupazione della pista in partenza, tempi di rilascio in arrivo, tempi di rilascio in partenza, tempi fra partenze e via-libera al rullaggio. La variabilità dei <i>buffer</i> (intertempi), invece, non è stata inclusa.</p>
Level 5	<p>Il modello contiene poche ipotesi di default: molti input sono costituiti dalle variabili inserite dall'operatore, e riguardano tutte le operazioni degli aeromobili e le configurazioni dell'aeroporto e dello spazio aereo.</p> <p>Molte variabili incluse nel modello hanno natura aleatoria per tenere conto della naturale variabilità degli orari dei voli, delle performance degli aeromobili e delle operazioni aeroportuali. Viceversa, tendenzialmente non viene considerata casuale la velocità sui sistemi di <i>taxiways</i>, tendendo a modellare le operazioni degli aerei sulle vie di rullaggio come condotte tutte alla stessa velocità (nonostante si possano aggregare per contesti di <i>taxiways</i> differenti).</p> <p>Questi modelli dovrebbero comunque essere sempre calibrati e validati con dati reali concernenti, ad esempio, i tempi di rullaggio degli aeromobili, i volumi di traffico e l'entità dei ritardi effettivamente sperimentati.</p>

	Output
Level 1	Capacità oraria in VFR/IFR, ASV in VFR/IFR, ritardi subiti dagli aeromobili.
Level 2	Capacità oraria/giornaliera/annua, ASV, ritardi orari/giornalieri/annui.
Level 3	Capacità oraria per ogni rapporto arrivo/partenza o percentuale di arrivi per la configurazione considerata. Può generare anche la curva di capacità (la c.d. curva di Pareto).
Level 4	Permette la produzione della curva di capacità oraria per sistemi complessi di piste di volo, in cui ogni punto rappresenta la stima della capacità di un'ora, per una prefissata percentuale di arrivi. Gli insiemi di punti vicini (ottenuti da simulazioni con simili valori medi) sono aggregati in centroidi così da poterli collegare e costruire la curva di capacità. Offre naturalmente un dettaglio superiore rispetto a quello dei modelli dei precedenti livelli. Un esempio di grafico di output è fornito in figura 2-13.

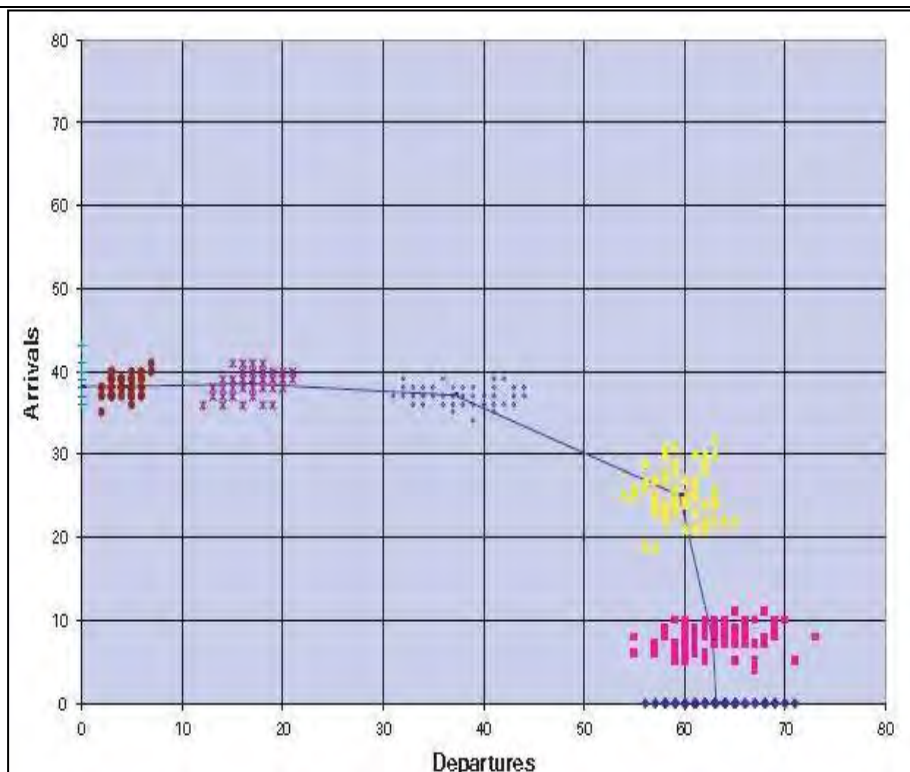


Figura 2-13: Esempio di curva di capacità prodotta dal *runwaysimulator* (volumi di flusso orari)

[fonte: TRB, 2012]

Level 5	Restituisce valori dettagliati delle grandezze in gioco nei vari livelli di modello come pure dei precisi calcoli dei ritardi che subiscono gli aeromobili nelle diverse componenti aeroportuali.
---------	---

	Applicazioni
Level 1	Per analisi estese di capacità (aeroporti esistenti o con ampie modifiche in progetto).
Level 2	Per analisi di capacità di alto livello (come master-plan aeroportuali), stime di singole componenti, studio degli effetti conseguenti all'introduzione di nuove infrastrutture (ad esempio, valutano il contributo alla capacità globale che le componenti sanno fornire separatamente).
Level 3	Per studi specializzati sulla capacità delle <i>runways</i> in cui le configurazioni siano di moderata complessità e le procedure di uso delle <i>runways</i> siano definite con chiarezza nella ripartizione fra arrivi e partenze.
Level 4	Permette la valutazione di capacità orarie di un sistema di piste di volo di <i>complesse</i> configurazioni; permette di valutare le innovazioni che si possono implementare sulle procedure e sulle infrastrutture aeroportuali.
Level 5	Permette di valutare tutte quelle situazioni in cui non è sufficiente focalizzarsi sulla <i>runway</i> ma bisogna valutare più componenti insieme, stimando le loro interazioni. Questi modelli sono i soli che permettono di stimare i tempi di rullaggio sul sistema di <i>taxiways</i> completo ed i ritardi conseguenti; inoltre, sono fondamentali per compiere analisi su orari di volo dettagliati (e valutare ad esempio gli effetti di loro modifiche).

	Limiti
Level 1	<p>Non-flessibilità del modello: non possono essere variate le ipotesi fatte (ad esempio, le configurazioni sono fissate, la <i>taxiway</i> è assunta estesa per tutta la lunghezza della <i>runway</i>, la strumentazione ILS è assunta sempre presente, e non possono essere considerate le limitazioni nello spazio aereo).</p> <p>Questi metodi (principalmente le tabelle presenti in Circolare) sono datati anche se largamente utilizzati negli USA.</p>
Level 2	<p>Non-flessibilità del modello: ad esempio, le configurazioni sono significative per la maggior parte delle infrastrutture ma non per la totalità dei casi reali e quando fosse necessario trattare casi non previsti, bisognerebbe passare ad un modello di maggiore livello di complessità; inoltre, le regole IFR/VFR sono assunte nei grafici e non possono essere variate; non sono ammesse limitazioni sullo spazio aereo ed è considerata sempre la presenza della torre ATC; non si possono valutare aeroporti con limitazioni ai velivoli più grandi; non c'è la possibilità di modificare queste assunzioni tenendo conto di nuove procedure o tecnologie innovative. Come nota, un nuovo modello, il <i>new Prototype Airfield Capacity Spreadsheet Model</i>, è progettato per ovviare a queste limitazioni.</p>
Level 3	<p>Limitazione del campo di studio del modello: si analizza solo la capacità della <i>runway</i> (i vincoli da <i>taxiway</i> e spazio aereo possono essere assunti implicitamente) oppure solo configurazioni di piste a moderata complessità (i layout complessi vanno studiati in post-processo dei risultati oppure combinando i risultati derivati dallo studio di più componenti analizzate separatamente).</p> <p>Per usare questo livello di modelli la configurazione reale deve essere disponibile nel modello oppure deve comunque essere possibile ottenerla combinando configurazioni disponibili. Qualunque restrizione (per dimensione di aereo o vincoli di rumore, ad esempio) deve essere assunta esternamente al modello.</p> <p>Il più diffuso metodo (l'ACM della FAA) ha specificatamente le seguenti limitazioni:</p> <ul style="list-style-type: none"> - molte ipotesi riguardanti la separazione fra arrivi e partenze sono legate al codice del modello e modificarle incide pesantemente sullo stesso; - non si possono valutare i casi di piste con restrizioni a specifici aerei (al massimo si può fare a livello di post-analisi).
Level 4	<p>Campo di analisi limitato: focalizza l'attenzione solo sulla <i>runway</i> e sugli ingressi/uscite dalla <i>taxiway</i>: altre informazioni sul sistema completo di vie di rullaggio non sono richieste. Implicitamente, possono essere considerate (e corrette) nel modello le seguenti caratteristiche: la presenza/assenza della <i>taxiway</i> parallela alla <i>runway</i> (aumentando il tempo di occupazione della pista) e la localizzazione delle <i>entrance taxiways</i> (attraverso l'aumento del distanziamento richiesto tra due successive partenze).</p> <p>Per fornire la curva di capacità non tiene in conto di programmi di volo dettagliato: è assunta infatti una domanda di saturazione continua, variabile a seconda del fleet mix che si decide di modellare. Le correnti di arrivi e partenze sono caratterizzate dall'avere sempre</p>

	un aereo in attesa.
Level 5	<p>Inserimento di input e analisi del contesto molto elaborato (per garantire un output dal dettaglio elevato): la capacità di modellazione della gran parte delle operazioni che un aereo può compiere comporta l'inserimento di una grande mole di informazioni; tuttavia, l'operatore può decidere i livelli di dettaglio delle informazioni fornite (ad esempio, l'utente può operare <i>su un sistema di gates</i> e non a livello di singolo gate).</p> <p>I limiti principali di questi modelli sono dunque costituiti dai tempi lunghi e dalle notevoli risorse necessarie per implementarli.</p>

2.5 IL MODELLO DI BLUMSTEIN (1959)

Un importante modello analitico, che rappresenta il primo metodo per la stima della capacità massima di arrivi di una pista di volo, si deve ad Alfred Blumstein²¹. Nel suo lavoro del 1959, egli ha analizzato il massimo volume di traffico in arrivo (λ) che una singola *runway* può sopportare; questa grandezza è definita come “il reciproco del minimo distanziamento temporale τ che sussiste fra due successivi atterraggi”:

$$\lambda = \frac{1}{\tau}.$$

In questa definizione è implicita la considerazione che gli arrivi si susseguano con continuità, saturando dunque la capacità della pista. Ad esempio, se il distanziamento minimo tra due atterraggi è pari a 1 minuto, la capacità della pista sarà uguale a 60 movimenti/ora.

Come visto nei paragrafi precedenti, in cattive condizioni meteo valgono le regole di volo strumentale (le cc.dd. *Instrumental Flight Rules*, IFR) secondo cui gli aeromobili devono rispettare precisi requisiti di sicurezza. In particolare, sono previsti due vincoli, uno relativo ai velivoli in volo ed un altro riguardante gli aeromobili a terra:

- In volo, data la notevole incertezza sulla loro effettiva posizione, è previsto un distanziamento spaziale minimo s_0 tra due velivoli, da misurarsi prendendo a riferimento l'istante in cui il primo velivolo attraversa il punto di ingresso del sentiero di avvicinamento alla pista;
- A terra, in considerazione del tempo medio di occupazione della pista da parte dell'aeromobile in manovra (il c.d. *Runway Occupancy Time*, ROT), è previsto un distanziamento temporale minimo t_0 compreso tra l'istante corrispondente al completamento della manovra dell'aereo leader (e sua conseguente uscita dalla *runway*) e l'istante in cui avviene il superamento della soglia di pista da parte dell'aereo follower.

La figura 2-14 esemplifica graficamente la situazione analizzata.

²¹ Potts C.N., Mesgarpour M., Bennell J.A. [2009]

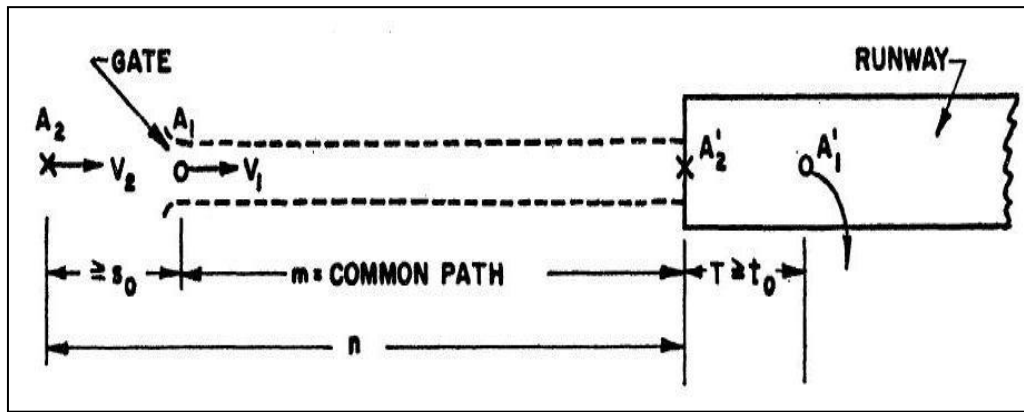


Figura 2-14: Rappresentazione grafica del problema analizzato da Blumstein [fonte: Blumstein, 1959]

Nel modello di Blumstein sono valide le seguenti ipotesi:

- Gli aeromobili atterrano sulla pista rispettando lo stesso ordine in cui si sono presentati al *gate* di ingresso del corridoio di avvicinamento, ovvero non sono ammessi sorpassi tra velivoli nel corridoio;
- Gli arrivi al *gate* degli aerei sono indipendenti fra loro ed in sequenza casuale;
- La pista di volo è ad uso esclusivo delle manovre di atterraggio ed opera al suo livello massimo di capacità; ovvero, gli aeromobili sono tutti al minimo distanziamento fra loro;
- Ogni aereo mantiene costante la propria velocità dal punto di attraversamento del *gate* fino al superamento della soglia della pista di volo.

Per quanto finora definito, dalla relazione seguente, si può definire la distanza n , compresa fra la soglia di pista e la posizione del velivolo follower in corrispondenza dell'istante in cui l'aereo leader transita per il *gate*, come:

$$n = m + s_0$$

dove:

- m è la lunghezza del sentiero comune di avvicinamento alla pista,
- s_0 è il distanziamento spaziale minimo al *gate*, già definito.

Dato il requisito dei distanziamenti imposti tra i due velivoli, sussiste una relazione anche tra le velocità V_1 e V_2 possedute dagli stessi.

In particolare, per ogni valore della velocità V_1 dell'aereo leader, esiste una velocità dell'aereo successivo V_2^* tale che il distanziamento tra i due velivoli passi, durante la fase di atterraggio, dal valore s_0 al valore corrispondente alla separazione temporale t_0 .

A seconda della relazione tra la velocità teorica V_2^* e la velocità effettiva V_2 la separazione tra i velivoli all'atterraggio sarà differente:

- se $V_2 > V_2^*$, il distanziamento sarebbe minore del limite imposto t_0 nel caso in cui al secondo aereo fosse concesso di procedere alla velocità desiderata: per evitare questa situazione, l'aereo sarà *trattenuto* al *gate* per un tempo sufficiente da permettergli di arrivare alla soglia di pista in condizione di rispettare esattamente il vincolo t_0 ; viceversa,
- Se $V_2 < V_2^*$, la separazione tra i velivoli sarà maggiore di t_0 e dipenderà dalle loro posizioni originarie e dalle rispettive velocità (m, n, V_1, V_2) .

In generale, per ogni coppia di valori delle velocità V_1 e V_2 , il tempo di separazione tra due atterraggi successivi sarà dato dalle relazioni:

$$T(V_1, V_2) = t_0 \text{ per } V_2 \geq V_2^*$$

E

$$T(V_1, V_2) = \frac{n}{V_2} - \frac{m}{V_1} \text{ per } V_2 \leq V_2^*$$

Da cui:

$$V_2^* = \frac{nV_1}{V_1 t_0 + m}.$$

Tali relazioni trovano anche una rappresentazione grafica nel piano (V_1, V_2) ; la prima relazione corrisponde all'area superiore alla curva, viceversa la seconda relazione è definita dall'area sottesa dal tratto curvilineo, dove i termini a e b indicano gli estremi dell'intervallo R delle velocità ammesse per i due velivoli (il c.d. *speed range*); questo insieme di valori descrive con la sua maggiore o minore ampiezza la tipologia di aerei ammessi all'atterraggio: tanto minore sarà R , tanto più simili saranno gli aeromobili e conseguentemente le loro velocità. Viceversa, un alto valore di R indica una notevole disomogeneità di velivoli.

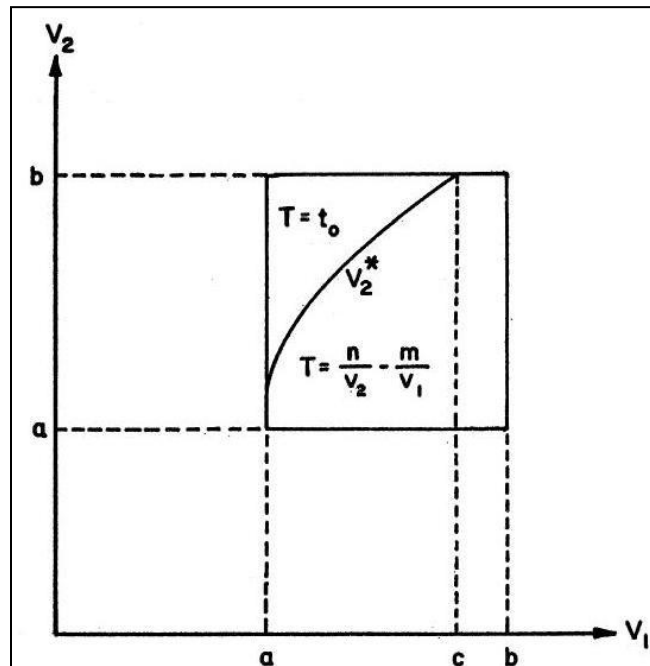


Figura 2-15: Distanziamento temporale in funzione delle velocità [Blumstein, 1959]

Per rappresentare la natura aleatoria delle *velocità* possedute dagli aerei in atterraggio, Blumstein ha ipotizzato due distribuzioni di velocità:

- La prima prevede che le velocità seguano una distribuzione uniforme continua all'interno dell'intervallo $R = [a, b]$;
- La seconda ipotesi prevede che le velocità seguano una distribuzione discreta: questa ipotesi permette di rappresentare il fatto che aerei della stessa tipologia atterrino verosimilmente alle *stessa* velocità e che aerei di categorie differenti abbiano invece velocità di avvicinamento diversa.

Utilizzando la prima ipotesi, Blumstein ha calcolato il massimo volume di arrivi λ al variare delle grandezze in gioco: i distanziamenti spaziali e temporali, la velocità media della sequenza di velivoli, la lunghezza del sentiero di avvicinamento alla pista, i valori che le velocità degli aerei possono assumere (intervallo $[a, b]$).

I risultati ottenuti sono stati rappresentati da Blumstein nei grafici seguenti e possono essere così riassunti:

- Fissata una velocità media dei velivoli (pari a 110 nodi),
- per un dato valore del distanziamento spaziale s_0 , il volume λ aumenta al ridursi dell'intervallo di distribuzione delle velocità e all'avvicinarsi del *gate* alla *runway* (ovvero, a seguito della diminuzione della lunghezza m);

- λ aumenta al diminuire del distanziamento spaziale s_0 , con effetti molto più rilevanti di quelli conseguenti ad una diminuzione del distanziamento temporale t_0 ;

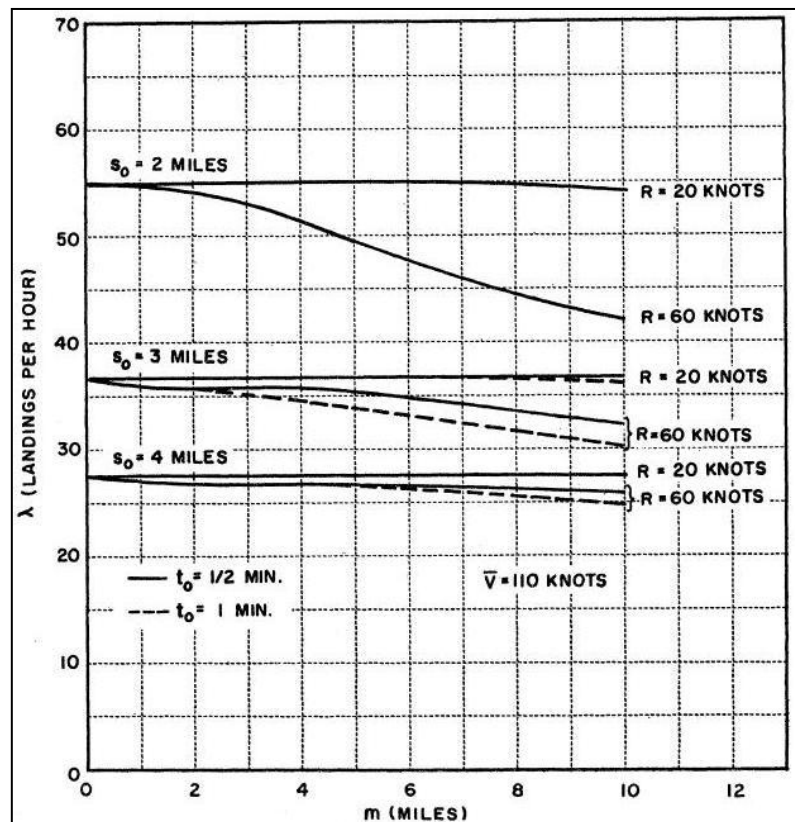


Figura 2-16: Massimo volume di arrivi vs. lunghezza del percorso di discesa (ipotesi di distribuzione uniforme delle velocità) [Blumstein, 1959]

- Fissati i valori dei due distanziamenti minimi e della distanza tra *gate* e *runway*, il volume λ aumenta al crescere della velocità media ed al diminuire dell'intervallo di distribuzione delle velocità.

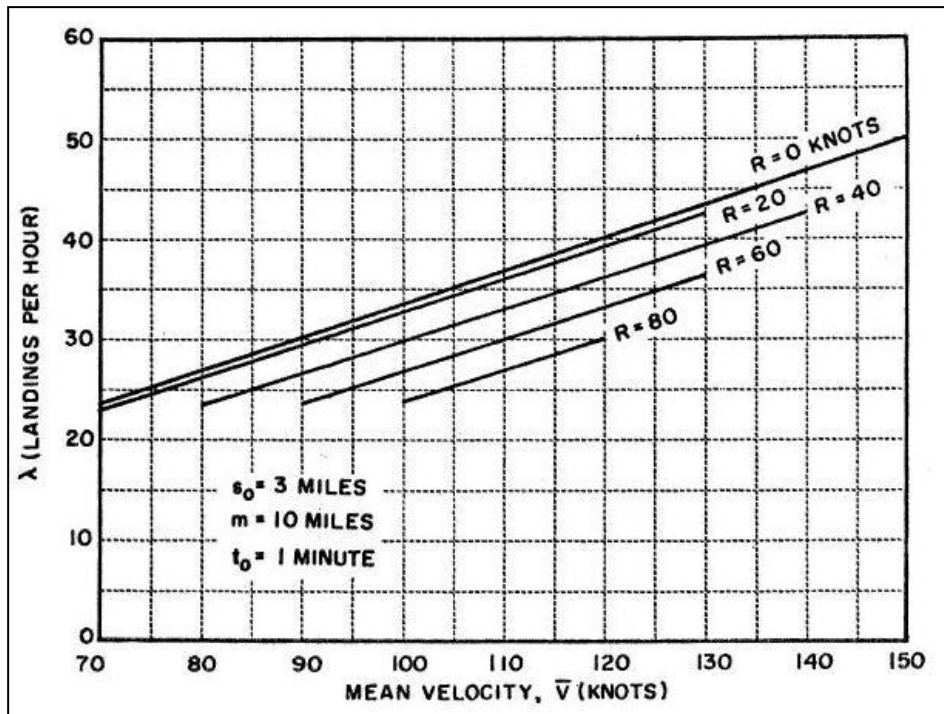


Figura 2-17: Massimo volume di arrivi vs. velocità media
(ipotesi di distribuzione uniforme delle velocità) [Blumstein, 1959]

In ipotesi di distribuzione discreta della velocità, Blumstein ha analizzato due contesti specifici, relativi a due aeroporti dell'area di New York (JFK²² e LaGuardia); i risultati ottenuti sono così sintetizzabili:

- A parità di valore dei distanziamenti e della lunghezza m , il volume di arrivi λ è sempre maggiore (anche se non in misura rilevante) all'aeroporto JFK rispetto a quello previsto per LaGuardia: questo fatto si giustifica con la diversa assunzione del valore di velocità media, basato sui dati sperimentali osservati (130 nodi a JFK, 117 nodi a LaGuardia);

²² L'aeroporto JFK all'epoca dello studio era denominato Idlewild.

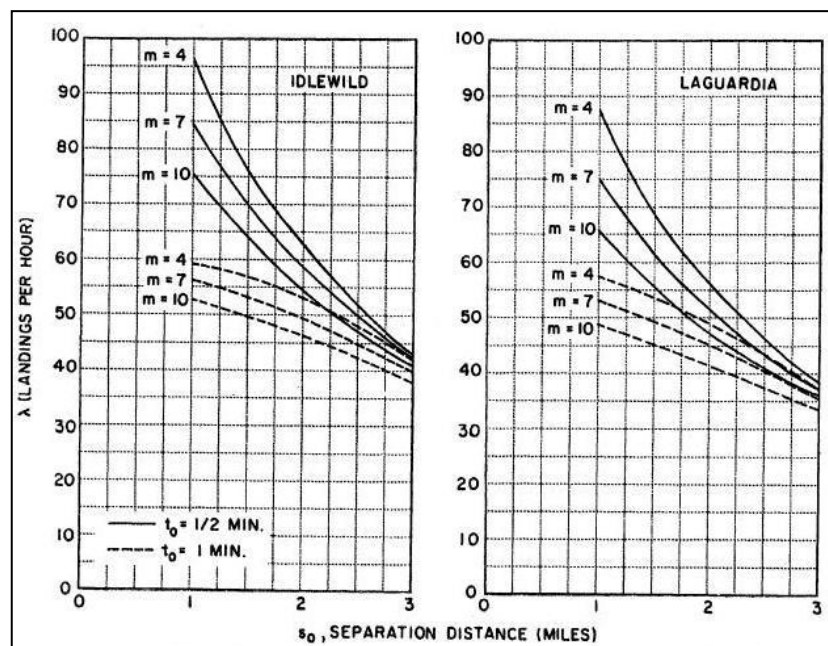


Figura 2-18: Volume di arrivi vs. separazione spaziale (ipotesi di distribuzione discreta delle velocità)

[Blumstein, 1959]

- Anche in questa ipotesi di distribuzione, la diminuzione del distanziamento temporale produce effetti positivi sul volume λ minori rispetto a quelli conseguenti ad una riduzione del distanziamento spaziale. In realtà, come si vede nella figura 2-18, il dimezzamento del valore di t_0 produrrebbe notevoli aumenti del volume λ solo nel caso in cui fosse possibile, contestualmente, una riduzione di s_0 fino al valore di 1 miglio. Tuttavia, per avere un ordine di grandezza delle variabili in gioco, va ricordato che il distanziamento s_0 previsto all'epoca di Blumstein, per la maggior parte delle operazioni in regime di volo strumentale IFR, prevedeva un distanziamento spaziale s_0 pari a 3 miglia, un distanziamento temporale t_0 di 1 minuto e una lunghezza del sentiero di discesa pari a 10 miglia.

In conclusione, il modello di Blumstein ha evidenziato due risultati principali:

- La diminuzione del distanziamento spaziale s_0 tra due velivoli successivi permette un aumento del volume di arrivi in una pista di volo; quanto più sono precisi i sistemi di posizionamento dei velivoli, tanto più questo distanziamento potrà essere ridotto;
- La specializzazione delle piste di volo a seconda delle tipologie di aereo permette una maggiore capacità di arrivi, in quanto diminuisce la variabilità della velocità con cui si avvicinano alla pista due aerei successivi.

Nonostante sia decisamente datato, il lavoro di Blumstein ha ancora una notevole valenza pratica: sul suo approccio concettuale al problema si basano molti dei modelli matematici che vengono implementati nei software. Inoltre, pur a costo di ipotesi semplificative non estreme, permette di eseguire varie analisi di sensibilità: si possono valutare facilmente – ancorché qualitativamente e per il caso semplificato di una pista singola – quali siano i fattori che incidono maggiormente sulle variazioni (in positivo ed in negativo) della capacità di pista^{23,24}.

2.6 IL METODO DI GILBO: RAPPRESENTAZIONE E STIMA DELLA CAPACITÀ (1993)

Un metodo di rappresentazione, valutazione ed ottimizzazione della capacità aeroportuale è stato proposto da Eugene P. Gilbo nel 1993.

Pur ponendo le sue basi su precedenti lavori di Newell²⁵ e Swedish²⁶, Gilbo ha dato una propria interpretazione del modo di rappresentare e stimare la capacità aeroportuale: fondamentali per la sua analisi sono le indagini statistiche su dati reali.

Nel suo studio, egli ha concentrato l'attenzione sugli aeroporti che la FAA definiva come *pacing airports*, ovvero gli aeroporti degli Stati Uniti il cui volume di traffico soddisfatto (o meno) impattava considerevolmente sull'intero sistema di trasporto aereo nazionale.

Precisamente, un *pacing airport* era definito da due condizioni:

- Elevato volume di traffico;
- Capacità operativa non sufficiente, frequentemente, per soddisfare la domanda di trasporto.

Abbiamo già visto che la capacità teorica dipende da molti fattori, tra cui i principali sono le condizioni meteorologiche, le configurazioni di pista, il rapporto tra arrivi e partenze e la flotta di aeromobili che intendono utilizzare l'infrastruttura. Inoltre, tra i primi studiosi a farlo, Gilbo nelle sue analisi ha tenuto in conto che la capacità aeroportuale intesa all'interno di una più generale gestione del traffico aereo può essere anche notevolmente influenzata sia da fattori relativi allo spazio aereo (come il numero di arrivi all'ingresso del sentiero di avvicinamento o all'interno del settore specifico interessato dall'aeroporto) sia

²³ Odoni A.R. et al. [1997]

²⁴ La Franca L., Castelluccio F., Cappelli A. [2008];

²⁵ Newell G.F. [1979]

²⁶ Swedish W.J. [1981]

da fattori umani (come il carico sopportato dai responsabili del controllo del traffico aereo aeroportuale).

In effetti, i modelli di analisi della capacità disponibili all'epoca consideravano la capacità come dipendente da parametri costanti, e precisamente veniva fornito usualmente un parametro per la capacità degli arrivi ed un altro per quella delle partenze. Queste due costanti dipendevano dalle differenti condizioni meteorologiche e dalla configurazione delle *runway* utilizzate ma rimanevano costanti per tutto il tempo in cui queste caratteristiche rimanevano stabili.

Questa considerazione ha portato Gilbo a dare una differente interpretazione della capacità, basandola anche sul rapporto di interdipendenza che sussiste fra la capacità degli arrivi e quella delle partenze, e a sviluppare un metodo di ottimizzazione della capacità stessa.

Si vuole affrontare ora la prima questione, descrivendo l'approccio empirico usato da Gilbo per stimare la capacità così da ottenerne valori che fossero il più aderenti possibili alla realtà e che tenessero in conto le restrizioni che derivavano al volume di traffico massimo possibile dalla diversa ripartizione della capacità tra arrivi e partenze.

Tradizionalmente, la capacità era sempre stata definita come il reciproco del distanziamento medio minimo possibile fra due movimenti, per una base temporale predefinita (ad esempio, per un intervallo di 15 minuti o di un'ora).

I modelli analitici fornivano la stima di questi intertempi prendendo in considerazione le incertezze sull'istante di arrivo in predefiniti punti di riferimento degli aeromobili in arrivo (o in partenza), la natura stocastica della variabile velocità, come pure la distribuzione aleatoria delle tipologie di aerei in operazioni successive.

Dalle ipotesi su queste variabili aleatorie, si giungeva alla stima del minimo intertempo ammesso fra le operazioni, corrispondente ad una specifica probabilità di non infrangere determinati vincoli per ragioni di sicurezza. Tuttavia, i valori di questi intertempi (e quindi, di conseguenza, della capacità aeroportuale) erano fortemente influenzati dalle ipotesi a priori imposte sulle variabili in gioco; di conseguenza, se i dati su cui erano state fatte tali ipotesi erano pochi, la validazione delle ipotesi non era necessariamente soddisfacente. Per Gilbo un modo di rendere più realistiche le stime così ottenute si ricava combinando ipotesi analitiche e dati sperimentali, in particolare quelli riguardanti le serie storiche del numero di arrivi e di partenze.

Le capacità di arrivi e di partenze ad un aeroporto sono legate dalla cosiddetta curva di capacità, rappresentata con forma convessa sul piano (C_a, C_d) , dove C_d è esprimibile in

funzione di C_a . L'esistenza di questa relazione dipende dall'interdipendenza fra le manovre e la curva rappresenta l'insieme delle capacità operative di un aeroporto *per specifiche condizioni esterne che sono state originariamente ipotizzate*.

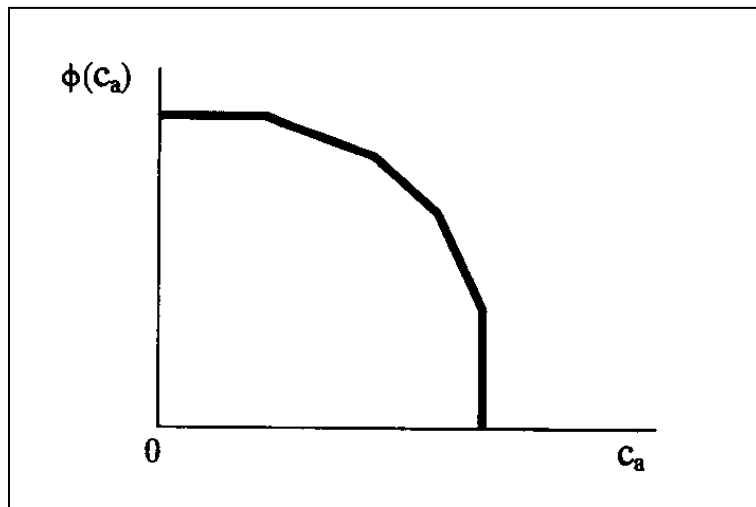


Figura 2-19: Rappresentazione grafica dell'interdipendenza della capacità di arrivi e di partenze
[fonte: Gilbo, 1993]

Gilbo ha utilizzato serie storiche relative *solo* ai cc.dd. *pacing airports*, suddividendo i dati degli arrivi e delle partenze e aggregandoli per predefiniti intervalli di tempo (ad esempio, 15 minuti): di conseguenza, si sono ottenuti i valori di capacità di arrivi e di partenze per dati intervalli (nell'esempio, la capacità di arrivi in 15 minuti).

Basandosi sui dati degli aeroporti maggiormente soggetti a picchi di traffico e fenomeni di non-soddisfacimento della domanda, è stato ragionevole assumere che i picchi che venivano identificati tra i vari periodi di tempo fossero effettivamente vicini alla massima capacità operativa degli aeroporti e costituissero dunque una sua ragionevole stima.

I dati osservati sono stati organizzati secondo le diverse condizioni operative così da ricavare delle curve di capacità corrispondenti; in particolare, Gilbo ha considerato come discriminanti le condizioni meteorologiche e le configurazioni d'uso delle *runway*.

Infatti, tutti i maggiori aeroporti (dotati di un complesso sistema di piste) possono cambiare configurazione di utilizzo molto frequentemente e di conseguenza i dati ottenuti sono stati associati alle rispettive capacità.

Le condizioni meteorologiche sono state invece raggruppate in quattro categorie che riflettessero le condizioni di *ceiling and visibility* (base dell'altezza nubi e visibilità), basandosi in larga parte su quella che era la classificazione usualmente prevista al riguardo: condizioni VFR, condizioni MVFR (*Marginal-VFR*), condizioni IFR e condizioni

LIFR (*Low-IFR*). Di conseguenza, Gilbo ha potuto stimare la capacità differenziandola a seconda di queste quattro condizioni.

Operativamente, il metodo è consistito nel graficare sul piano delle capacità di arrivi e partenze i dati reali; ad esempio, nella figura 2-20 si vede l'insieme di punti corrispondenti a tutti gli arrivi e partenze osservate per intervalli di 15 minuti per un intero periodo di osservazione.

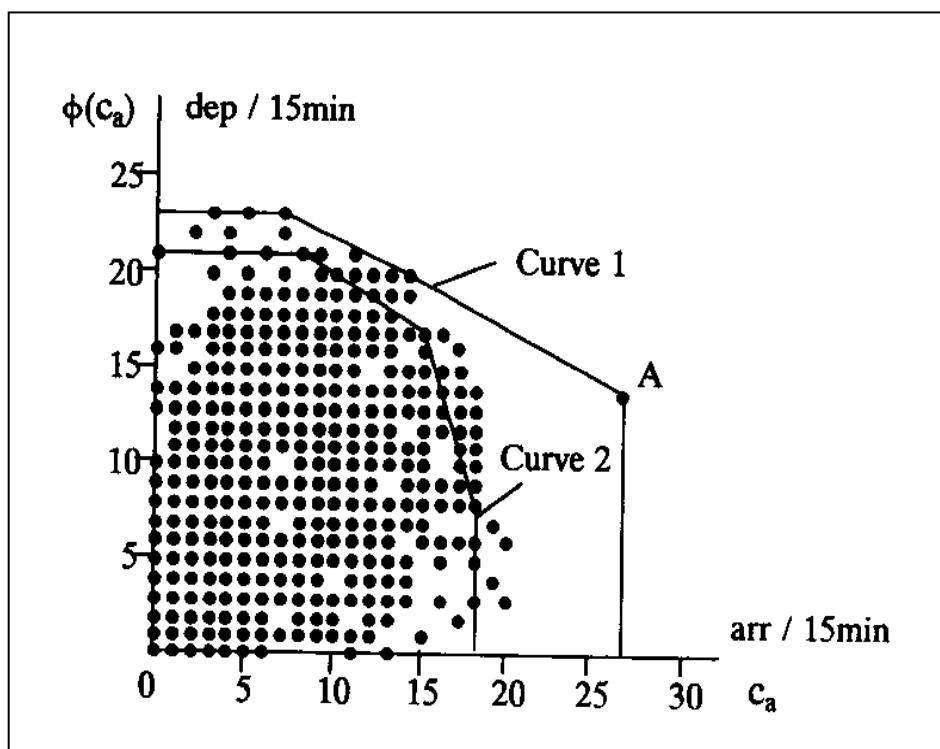


Figura 2-20: Esempio della rappresentazione di dati sperimentali e curve di capacità per un intervallo di 15 minuti.

[Gilbo, 1993]

In prima approssimazione, la curva di capacità si potrebbe definire collegando linearmente per segmenti i punti più esterni rappresentati sul piano. Tuttavia, Gilbo ha proceduto escludendo punti singolari nella curva di capacità (i cc.dd. *outliers* dei dati osservati).

Questi punti estremi, non significativi, possono:

- Derivare da errori nel processo di acquisizione dei dati sperimentali, oppure
- Rappresentare effettivamente dei dati reali ma relativi a condizioni di funzionamento molto rare, caratteristiche di situazioni molto lontane dai limiti operativi ottenibili in un ristretto periodo di tempo (i 15 minuti, ad esempio).

Per rendere la stima realistica, Gilbo ha valutato criteri differenti per l'eliminazione dalle serie dei punti estremi (come il punto A in figura 2-20). La definizione del criterio di non considerazione di *outliers* ha determinato differenze nel processo di stima. Possibili

criteri di eliminazione erano la valutazione della distanza di questi punti dalle osservazioni più prossime oppure la frequenza con cui queste osservazioni erano state rilevate.

Gilbo ha optato per quest'ultima scelta: di conseguenza, le condizioni estreme che erano state osservate al di sotto di una certa frequenza venivano eliminate dalla serie.

Le barre corrispondenti ad ogni coppia di arrivi/partenze in 15 minuti sono il risultato del rapporto tra il numero di accadimenti per quella coppia e il numero totale di osservazioni. Le stime delle curve di capacità sono state dunque rappresentate come semplici curve a due-dimensioni che rispettassero un certo valore di percentile, ovvero a cui corrispondesse un valore di accadimento superiore ad un certo limite.

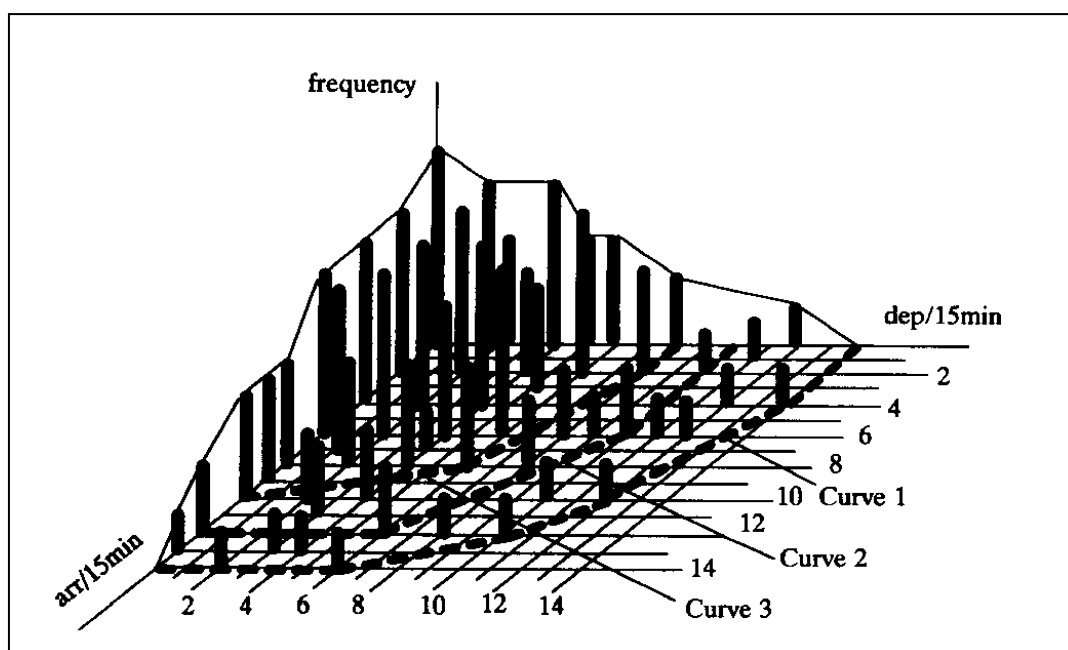


Figura 2-21: Esempio di istogramma delle frequenze dei movimenti arrivi/partenze.

[Gilbo, 1993]

Ad esempio, la curva 1 in figura 2-21 rappresenta un percentile del 100 per cento: evidentemente, includendo anche le coppie di arrivi/partenze con accadimento singolo, non è stata considerata come una curva rappresentativa della capacità effettiva dell'infrastruttura.

La curva 3, più realistica, è stata ottenuta da Gilbo definendo un percentile tale che l'accadimento minimo degli eventi per poter essere considerati nella serie fosse pari a tre.

In conclusione del lavoro di stima e rappresentazione, Gilbo ha esplicitato un importante considerazione. Il procedimento così descritto permette una stima ragionata e sufficientemente attendibile della capacità operativa in termini di combinazione di arrivi e di partenze per un dato intervallo di tempo (15 minuti). L'autore ha segnalato che un tale li-

vello di prestazione non è sostenibile per diversi intervalli consecutivi di 15 minuti: la sostenibilità di mantenere per più intervalli di tempo il limite della capacità è inficiato significativamente da fattori umani (possono lavorare al limite della loro produzione per un tempo limitato) e dalle caratteristiche della domanda di traffico.

Queste due considerazioni giustificano il risultato finale dell'analisi, secondo il quale i picchi di capacità corrispondenti ad analisi sui 30 o 60 minuti sono inferiori al doppio dei livelli di picco ottenuti con analisi condotte sui 15 o 30 minuti rispettivamente.

Gilbo ha potuto dimostrare la validità delle stime risultanti dai suoi studi grazie al confronto con i dati rilevati dalla FAA per lo stesso contesto aeroportuale.

Ad esempio, nella figura 2-22 sottostante si rapportano la stima della curva di capacità ottenuta da Gilbo – corrispondente a tre livelli di percentile – ed il valore di capacità registrato – come indicativo del livello di capacità massima – da parte della FAA per l'aeroporto di San Francisco; il confronto è stato effettuato tra dati relativi alla stessa configurazione di utilizzo delle *runway* (due piste di volo destinate esclusivamente alle partenze ed altrettante agli arrivi).

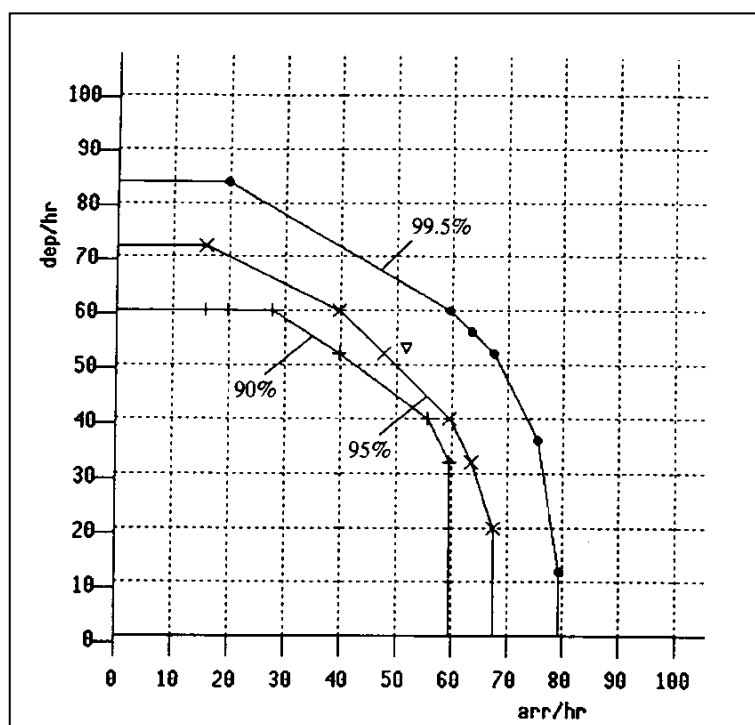


Figura 2-22: Confronto tra stima di capacità a diversi percentili con capacità operativa fornita da FAA
[Gilbo, 1993]

Nel caso in esame, le curve di Gilbo sono state ottenute da un'analisi statistica condotta su 6688 coppie di punti, ricavati da una serie di dati registrati continuamente in un periodo di otto mesi e successivamente aggregati in intervalli da 15 minuti ciascuno.

Dal grafico presentato in figura 2-22, si evince la conferma che le curve stimate col metodo di Gilbo rappresentano effettivamente un livello di operatività dell'infrastruttura pari (o pressoché pari) alla quota di capacità massima raggiungibile dalla stessa (il punto corrispondente al valore pubblicato dalla FAA, e considerato da essa come il valore effettivo di capacità operativa, è incluso tra le curve corrispondenti ai percentili 95-99,5).

La modernità del metodo di Gilbo per la stima e la rappresentazione della capacità è verificata ancora attualmente; i punti principali del lavoro sono due: la conferma della relazione di interdipendenza delle capacità di arrivi e di partenze (sulla base di dati sperimentali ed analisi statistiche) e l'inclusione della ripartizione della capacità tra arrivi e partenze tra le caratteristiche fondamentali di operatività dell'infrastruttura (insieme alle condizioni meteorologiche e alla configurazione d'uso delle piste).

2.7 IL METODO DI GILBO: L'OTTIMIZZAZIONE DELLA CAPACITÀ (1993)

Ottenute con la modalità descritta, le curve di Gilbo sono in grado di fornire delle informazioni dettagliate sui limiti operativi dell'infrastruttura *per un ampio spettro di valori del rapporto tra arrivi e partenze* e per diverse condizioni di funzionamento dell'aeroporto.

Idealmente, questa conoscenza permetterebbe al gestore dell'infrastruttura di scegliere tra il ventaglio di situazioni descritte dalla curva di capacità proprio la condizione operativa che meglio soddisfi le condizioni di domanda in atto. Purtroppo, come osservato da Gilbo nel suo lavoro, è estremamente difficoltoso trovare la migliore soluzione per una condizione di "severa congestione" dell'infrastruttura dal momento che l'andamento della domanda può variare in maniera sostanziale durante tale tempo.

Gilbo ha dunque proposto un suo metodo per l'ottimizzazione della capacità aeroportuale: esso mira alla miglior ripartizione delle capacità tra arrivi e partenze cosicché l'infrastruttura sia in grado di soddisfare la domanda in modo ottimale per un periodo di tempo in cui sono mantenute valide le condizioni operative di funzionamento.

Il metodo si basa su un modello matematico in cui viene ipotizzato che gli arrivi e le partenze siano interdipendenti fra loro sia sul lato della domanda d'uso sia sul lato dell'offerta di capacità.

Il modello di Gilbo considera come variabili di decisione le due capacità (degli arrivi e delle partenze) che devono essere determinate secondo il criterio di ottimizzazione

che si va ad ipotizzare. Nello specifico, la scelta di questo criterio rappresenta un importante aspetto della formulazione del problema. In effetti, l'efficacia delle operazioni di arrivo o di partenza ad un aeroporto può essere misurata dalla durata dei ritardi subiti dagli aerei serviti (ovvero, il tempo totale di attesa nelle code in arrivo ed in partenza) oppure dal numero totale di voli in coda durante il periodo di tempo interessato. Naturalmente, questi due indicatori sono strettamente legati fra loro: code più lunghe daranno luogo a ritardi più consistenti. La decisione su quale sia il criterio di ottimizzazione da scegliere dipende *anche* dal tipo di dati di cui si dispone e dalla complessità della soluzione da ricercare che deriva da questa scelta.

Nel suo lavoro, Gilbo ha preso come criterio il numero totale di voli in coda; il motivo principale di questa scelta è il livello strategico – e non tattico – del problema analizzato. Difatti, come dato di input si usa la domanda aggregata su 15 minuti e non singoli dati relativi ad uno specifico volo: in effetti, la domanda totale può essere usata facilmente per calcolare la lunghezza delle code ma non i ritardi subiti da ogni singolo volo in coda.

Inoltre, dal punto di vista computazionale, l'uso del numero totale di voli in coda come variabile richiede un algoritmo di soluzione meno complesso di quello previsto dalla prima opzione.

La soluzione ottima del problema corrisponde ai *“valori di capacità di arrivi e di partenze, per ciascun intervallo di 15 minuti, che minimizzano il numero totale dei voli in coda in arrivo ed in partenza”*.

Nel problema di Gilbo, vengono definite le seguenti grandezze:

- T è il tempo totale di interesse, suddiviso negli N intervalli di lunghezza Δ (ad esempio, $\Delta = 15 \text{ min}$);
- $I = \{1, 2, \dots, i, \dots, N\}$ è l'insieme degli intervalli in cui è suddiviso il periodo di tempo totale T ;
- a_i e d_i rappresentano rispettivamente la domanda di arrivi e di partenze per l'intervallo generico i ;
- X_i e Y_i sono le variabili di stato del problema e rappresentano, rispettivamente, le code in arrivo ed in partenza all'inizio di ogni intervallo generico i , con i che varia da 1 a $N + 1$;
- Φ è l'insieme delle curve di capacità, ovvero $\Phi = \{\phi^{(1)}(u), \phi^{(2)}(u), \dots, \phi^{(s)}(u)\}$, dove ogni curva di capacità corrisponde ad una specifica configurazione d'uso di pista e condizione meteorologica;

- $\phi_i(u)$ è la curva di capacità di arrivi/partenze per la configurazione considerata nel generico intervallo i , ovvero $\phi_i(u) \in \Phi, i \in I$;
- u_i e v_i rappresentano le variabili di decisione, ovvero rispettivamente le capacità di arrivo e di partenza per l'intervallo generico $i \in I$.

Lo scopo del problema risulta essere la determinazione della sequenza delle capacità di arrivi e di partenze (ovvero, le variabili u_i e v_i) che meglio soddisfa la domanda di traffico.

Analiticamente, il problema generale di ottimizzazione della capacità aeroportuale corrisponde al seguente problema di minimizzazione:

$$\min_{u^*} \sum_{i=1}^N F_i(X_{i+1}, Y_{i+1})$$

dove la funzione obiettivo $F_i(X_{i+1}, Y_{i+1})$, con $i \in I$, rappresenta una funzione di costo ed il vettore $u^* = (u_1, u_2, \dots, u_N, v_1, v_2, \dots, v_N)$ descrive le capacità ottime di arrivo e di partenza (per ciascun intervallo i -esimo definito); la minimizzazione della funzione è soggetta ai seguenti vincoli:

$$\begin{aligned} X_{i+1} &= \max(0, X_i + a_i - u_i), i \in I \\ Y_{i+1} &= \max(0, Y_i + d_i - v_i), i \in I \\ X_1 &= X_0 \geq 0; Y_1 = Y_0 \geq 0, \text{ come condizioni iniziali} \\ 0 &\leq v_i \leq \phi_i(u_i), \phi_i(u) \in \Phi, i \in I \\ 0 &\leq u_i \leq B_i, i \in I \end{aligned}$$

dove B_i rappresenta il massimo valore utilizzabile come capacità di arrivi durante ogni intervallo $i \in I$. Le variabili del problema u_i, v_i, X_i, Y_i sono variabili intere.

Il problema può essere meglio definito esplicitando la funzione di costo:

$$F_i(X, Y) = \gamma_i[\alpha_i X^k + (1 - \alpha_i)Y^k], \text{ con } k > 0, i \in I.$$

Dunque, il problema generale di ottimizzazione di Gilbo diventa:

$$\min_{u^*} \sum_{i=1}^N \gamma_i[\alpha_i X_{i+1}^k + (1 - \alpha_i)Y_{i+1}^k], \text{ con } 1 \geq \alpha_i \geq 0$$

il quale sarà soggetto agli stessi vincoli indicati in precedenza.

Questo problema consiste dunque nel minimizzare una somma pesata delle code in arrivo ed in partenza (con il valore delle code elevate in questa forma originaria al generico esponente k), per tutti gli intervalli di tempo compresi nel periodo T : ad esempio, ipotizzando $k = 1$, la formula indicata corrisponderebbe a minimizzare la somma semplice delle

code (pesate), mentre con $k = 2$ si minimizzerebbero le somme (pesate) dei quadrati delle code, e così via.

Nella formulazione, riveste un ruolo centrale il coefficiente α_i il quale descrive il tasso di priorità assegnato agli arrivi nell'intervallo generico i ; la corrispondente priorità assegnata alle partenze sarà il suo complementare ad 1.

Il coefficiente γ_i rappresenta il costo relativo dell'intervallo generico i , ovvero permette di assegnare un valore di costo differente a ciascun intervallo; in particolare, nei casi reali, questo coefficiente può descrivere la maggiore o minore attendibilità dei valori delle quantità di traffico (domanda di arrivi o di partenze) e delle condizioni meteorologiche. In generale, dunque, dal momento che gli intervalli più lontani nel tempo sono caratterizzati da una previsione meno attendibile vedranno assegnare un valore inferiore al loro coefficiente γ_i .

In merito ai vincoli a cui è soggetta la funzione obiettivo, si segnala che gli ultimi tre assegnano le condizioni iniziali alle variabili e determinano i campi di variazione delle variabili di controllo mentre le prime due condizioni descrivono la dinamica delle code all'interno dell'intero periodo di osservazione T : il numero dei voli ritardati all'inizio di ogni intervallo i -esimo generico dipende dal numero di voli ritardati nel precedente intervallo e dalla differenza tra la domanda e la capacità nell' i -esimo intervallo.

In effetti, nel caso in cui la capacità di arrivi e/o di partenze (u_i e v_i) sia uguale o maggiore al numero di velivoli in attesa del servizio nell'intervallo considerato, non vi sarà alcuna coda all'inizio del successivo intervallo. Viceversa, i valori di X_{i+1}, Y_{i+1} saranno non nulli.

Assumendo un valore unitario del coefficiente k , il problema di ottimo generale diventa dunque la minimizzazione di una funzione di costo lineare:

$$\min_{u^*} \sum_{i=1}^N \gamma_i [\alpha_i X_{i+1} + (1 - \alpha_i) Y_{i+1}], \text{ con } 1 \geq \alpha_i \geq 0$$

che corrisponde alla minimizzazione di una somma pesata delle code di voli in arrivo ed in partenza per tutti gli intervalli di tempo compresi nel periodo totale T .

Se l'interesse è solo il risultato alla fine del periodo T , la funzione di costo si applica all'intervallo N -esimo della serie, ed il criterio di minimizzazione diventa:

$$\min_{u^*} [\alpha X_{N+1} + (1 - \alpha) Y_{N+1}], \text{ con } 1 \geq \alpha \geq 0.$$

In questo modo, si vuole minimizzare la somma pesata delle code in arrivo ed in partenza alla fine del periodo T , dove il coefficiente α rappresenta la priorità che si vuole dare agli arrivi nel processo di assegnazione della capacità aeroportuale.

Al limite, imponendo ad α un valore unitario, solo la coda degli arrivi sarebbe minimizzata; viceversa, imponendo ad α un valore nullo, verrebbe minimizzata esclusivamente la coda delle partenze. Una minimizzazione combinata delle code degli arrivi e delle partenze è invece ottenuta per qualunque valore di α compreso all'interno dell'intervallo di definizione, estremi esclusi.

Nel suo lavoro, Gilbo ha risolto il problema di minimizzazione nel caso particolare in cui la funzione Φ abbia una forma lineare con un modello di programmazione lineare. Secondo la nuova ridefinizione del problema, alla minimizzazione delle somme pesate delle code in arrivo ed in partenza di tutti gli intervalli corrisponde una massimizzazione delle somme pesate delle capacità di arrivi e di partenze.

Analogamente al problema generale, se siamo interessati alla minimizzazione delle somme pesate delle code alla fine del periodo di tempo T , nel modello di programmazione lineare andranno massimizzate le cumulate delle capacità di arrivi e di partenze.

2.8 IL METODO DI GILBO: ESEMPIO NUMERICO (1993)

Consideriamo ora l'applicazione numerica proposta da Gilbo nel suo studio del 1993.

Sia data la previsione di domanda per un aeroporto riassunta in tabella; si stima che a causa di questi movimenti in arrivo ed in partenza l'aeroporto subirà una “severa congestione” dalle 12:00 alle 13:00: la domanda prevista eccederà la capacità ed alcuni voli saranno ritardati.

Il problema consiste nel *determinare qual è la ripartizione ottimale di capacità tra arrivi e partenze che sia in grado di soddisfare al meglio la domanda durante l'intero periodo di un'ora.*

Intervallo temporale	Domanda prevista	
	Arrivi	Partenze
12:00 – 12:15	$a_1 = 13$	$d_1 = 35$
12:15 – 12:30	$a_2 = 32$	$d_2 = 2$
12:30 – 12:45	$a_3 = 24$	$d_3 = 28$
12:45 – 13:00	$a_4 = 10$	$d_4 = 20$
Domanda totale (12:00 – 13:00):	79	85

Nel grafico arrivi-partenze della figura 2-23 sottostante, sono indicati i quattro livelli di domanda da soddisfare e la curva di capacità della pista di volo; questa curva corrisponde alle capacità di arrivi/partenze per le condizioni operative previste nella stessa ora (condizioni meteorologiche e configurazione d'uso della pista, tutto riferito all'intervallo singolo di durata 15 minuti).

Si evidenzia:

- La massima capacità di arrivi/partenze è pari, rispettivamente, a 25 voli e 30 voli ogni 15 minuti;
- Il volume massimo di capacità (arrivi più partenze) è pari a 45 voli in 15 minuti (condizione di 15 arrivi e 30 partenze in 15 minuti);
- La capacità in corrispondenza ad una ripartizione equa di volume di traffico tra arrivi e partenze è pari a 21 voli ogni 15 minuti (punto della curva, 21 arrivi e 21 partenze).

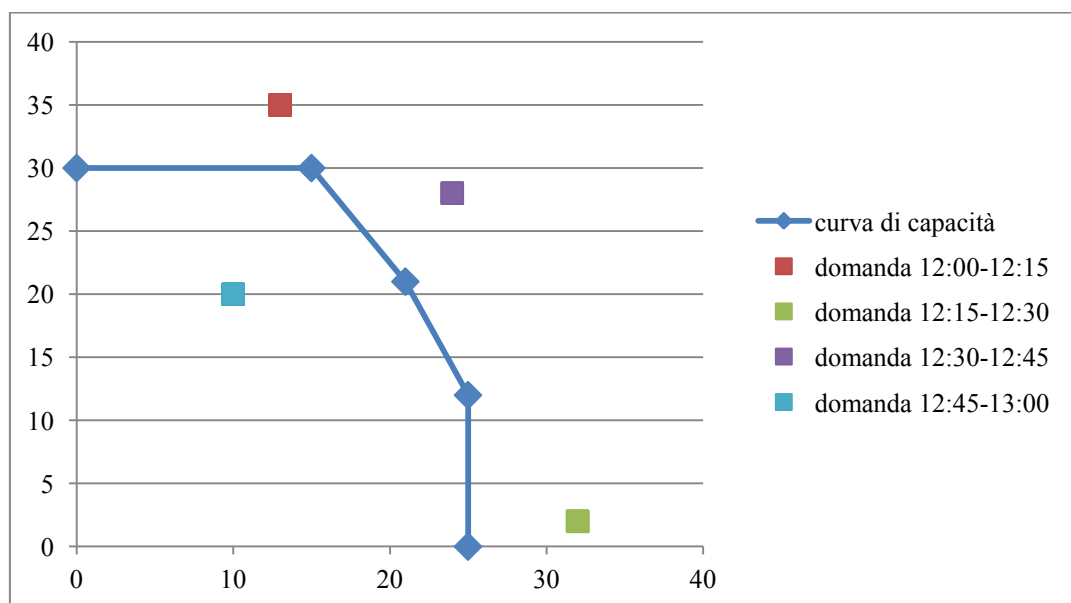


Figura 2-23: Curva di capacità e livelli di domanda [Elaborazione su dati Gilbo, 1993]

In questo problema, il tempo totale T è pari ad un'ora e viene suddiviso in quattro intervalli da 15 minuti ciascuno: il vettore di decisione che definisce la minimizzazione della funzione di costo è $u^* = (u_1, u_2, u_3, u_4, v_1, v_2, v_3, v_4)$, composto da 4 termini indicanti 4 arrivi ed altrettanti indicanti le 4 partenze.

Secondo il criterio espresso nel problema di ottimizzazione generale, si vuole minimizzare la somma pesata delle code in arrivo/partenza durante l'intero periodo di tempo T . Viene ragionevolmente supposto che all'inizio del periodo le code siano nulle per entrambi i movimenti ($X_1 = Y_1 = 0$).

Il problema di programmazione lineare fornisce i risultati espressi in tabella; sono state calcolate le capacità ottime per due ipotesi di tasso di priorità degli arrivi ($\alpha = 0,5$ e $\alpha = 0,7$). In tabella sono inoltre forniti i velivoli in coda alla fine di ogni intervallo temporale ed il numero totale di aeromobili ritardati per i due movimenti nell'intera ora.

Intervallo temporale	Domanda prevista		Fattore di priorità degli arrivi $\alpha = 0,5$			
			Capacità ottima		Code	
	Arrivi	Partenze	Arrivi	Partenze	Arrivi	Partenze
12:00 – 12:15	$a_1 = 13$	$d_1 = 35$	$u_1 = 13$	$v_1 = 30$	0	5
12:15 – 12:30	$a_2 = 32$	$d_2 = 2$	$u_2 = 25$	$v_2 = 7$	7	0
12:30 – 12:45	$a_3 = 24$	$d_3 = 28$	$u_3 = 17$	$v_3 = 27$	14	1
12:45 – 13:00	$a_4 = 10$	$d_4 = 20$	$u_4 = 21$	$v_4 = 21$	3	0
Totale:	79	85	76	85	24	6

Intervallo temporale	Domanda prevista		Fattore di priorità degli arrivi $\alpha = 0,7$			
			Capacità ottima		Code	
	Arrivi	Partenze	Arrivi	Partenze	Arrivi	Partenze
12:00 – 12:15	$a_1 = 13$	$d_1 = 35$	$u_1 = 13$	$v_1 = 30$	0	5
12:15 – 12:30	$a_2 = 32$	$d_2 = 2$	$u_2 = 25$	$v_2 = 7$	7	0
12:30 – 12:45	$a_3 = 24$	$d_3 = 28$	$u_3 = 21$	$v_3 = 21$	10	7
12:45 – 13:00	$a_4 = 10$	$d_4 = 20$	$u_4 = 20$	$v_4 = 22$	0	5
Totale:	79	85	79	80	17	17

I valori di capacità ottima variano da intervallo ad intervallo, in risposta all'andamento temporale della domanda.

Si evidenzia:

- In risposta all'aumento del tasso di priorità degli arrivi da 0,5 a 0,7, le capacità dei movimenti sono ridistribuite in due intervalli temporali (dalle 12:30 alle 13:00) così da permettere di diminuire le code dei voli in arrivo da 24 totali a 17;
- Questa dinamica più favorevole agli arrivi ha un riscontro sul livello di velivoli in partenza ritardati: alla fine del periodo T , nel caso di $\alpha = 0,5$ non ci sono velivoli in partenza in coda, mentre nel caso di $\alpha = 0,7$ la coda è composta da 5 aerei;
- Col primo tasso di priorità, la capacità ottima ottenuta permette di risolvere completamente il problema di coda in partenza (0 velivoli) mentre nel secondo caso la capacità ottima consente l'annullamento della coda in arrivo;
- I voli singoli che subiscono ritardi nei due casi di priorità sono pari a 14 arrivi e 6 partenze nel primo caso e a 10 arrivi e 12 partenze nel secondo caso: aumentando il tasso di priorità dei voli in arrivo, raddoppia il numero di velivoli in partenza che subiscono l'inserimento in coda.

Per valutare i benefici che derivano da una ripartizione ottimale della capacità che sia *dinamica* nel periodo T (ovvero, che sia variabile da intervallo ad intervallo), l'autore ha provveduto a risolvere un problema di ottimizzazione che prevedesse un livello di redistribuzione della capacità tra arrivi/partenze *costante* per l'intero periodo di riferimento; sono stati anche calcolati i livelli corrispondenti di coda.

Il problema di ottimizzazione ha, in questo caso, come variabili di decisione solo due termini all'interno del vettore u^* ovvero, $u^* = (u, v)$.

Come prima, le lunghezze di coda sono state calcolate per due livelli del tasso di priorità degli arrivi. Nella tabella vengono evidenziati per confronto i valori di coda riferiti alle capacità ottime variabili ricavati precedentemente.

Intervallo temporale	Fattore di priorità degli arrivi $\alpha = 0,5$			
	Code hp: capacità ottime <u>costanti</u> $u^* = (u, v)$		Code hp: capacità ottime <u>variabili</u> $u^* = (u_1, u_2, u_3, u_4, v_1, v_2, v_3, v_4)$	
	Arrivi	Partenze	Arrivi	Partenze
	12:00 – 12:15	0	14	0
12:15 – 12:30	11	0	7	0
12:30 – 12:45	14	7	14	1
12:45 – 13:00	3	6	3	0
Totale:	28	27	24	6

Intervallo temporale	Fattore di priorità degli arrivi $\alpha = 0,7$			
	Code hp: capacità ottime <u>costanti</u> $u^* = (u, v)$		Code hp: capacità ottime <u>variabili</u> $u^* = (u_1, u_2, u_3, u_4, v_1, v_2, v_3, v_4)$	
	Arrivi	Partenze	Arrivi	Partenze
	12:00 – 12:15	0	16	0
12:15 – 12:30	10	0	7	0
12:30 – 12:45	12	9	10	7
12:45 – 13:00	0	10	0	5
Totale:	22	35	17	17

Con il primo valore del tasso di priorità, la ripartizione ottimale delle capacità costanti prevede un numero identico di arrivi/partenze in 15 minuti: i 21 movimenti già ricordati in premessa. Alla fine del periodo T (alle ore 13:00), le capacità ottime costanti producono 9 voli ritardati (3 velivoli in ritardo in arrivo e 6 in partenza), laddove la ripartizione con capacità ottime variabili produceva solamente 3 velivoli in arrivo in coda.

Con il secondo valore del tasso di priorità, invece, le capacità ottime costanti – valide per l'intero periodo di tempo T – prevedono una ripartizione ottimale di 22 voli in arrivo e 19 voli in partenza (sempre ogni 15 minuti). Anche in questo caso, i velivoli presenti in coda alla fine dell'ora sono significativamente maggiori rispetto al caso di capacità ottima variabile da intervallo ad intervallo: non si hanno velivoli in arrivo in coda, tuttavia ben 10 aerei in partenza risultano ritardati (rispetto ai 5 del caso precedente, a parità di tasso di priorità).

Si evidenzia inoltre che la ripartizione ottimale della capacità tra arrivi e partenze che sia variabile da intervallo ad intervallo permette di avere code inferiori, o al limite uguali, (rispetto al caso di capacità assunta costante) in ogni suddivisione temporale di 15 minuti.

L'autore ha poi evidenziato l'utilità del processo di ottimizzazione nell'utilizzo delle risorse di capacità aeroportuale:

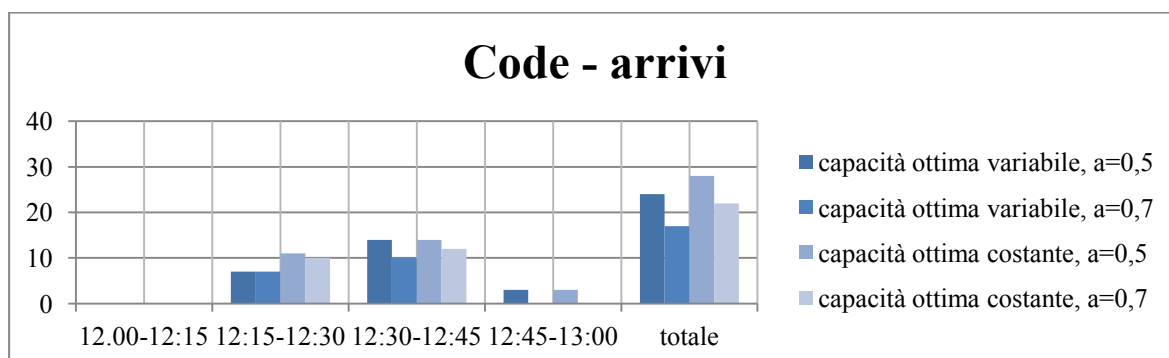
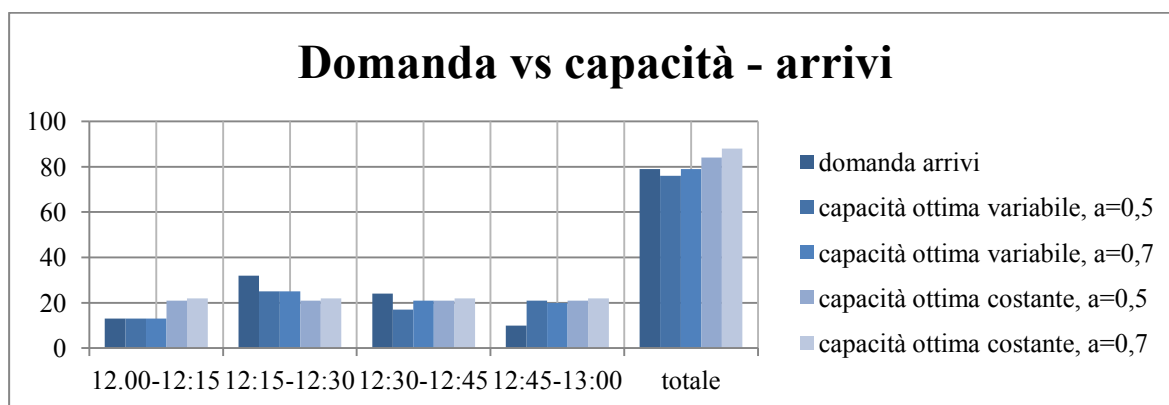
- Ricordando che la domanda da soddisfare nell'ora di interesse era pari a 79 movimenti in arrivo e 85 in partenza (164 movimenti totali),
- Per il primo valore del tasso di priorità, la capacità espressa è pari a 161 voli totali (76 arrivi e 85 partenze): queste capacità ottime sono approssimativamente congruenti con la domanda e producono effettivamente 3 voli in ritardo alla fine del periodo (3 velivoli in arrivo e 0 in partenza);
- Nel caso del secondo tasso di priorità, la capacità totale espressa nell'ora è pari a 159 voli ed il numero di velivoli presenti in coda alla fine del periodo T è pari a 5 (0 arrivi e 5 partenze);
- La situazione è abbastanza diversa nel caso di capacità ottima costante nell'intero intervallo e non dinamicamente variabile tra i quattro intervalli; come prima ricordato, nel caso del tasso di priorità pari a 0,5, la capacità è di 21 movimenti per gli arrivi ed altrettanti per le partenze: in un'ora si produce dunque capacità per 168 movimenti, tuttavia alla fine del periodo vi sono 9 velivoli presenti in coda (3 in arrivo e 6 in partenza), nonostante la produzione di capacità complessivamente offerta sia superiore alla domanda (168 movimenti contro 164) e nonostante la capacità riferita al solo caso di arrivi sia anch'essa superiore (84 movimenti contro i 79 richiesti), cosa che permetterebbe di presumere un'assenza totale di code in arrivo;
- L'apparente paradosso riscontrato è causato dall'operare con capacità ottime calcolate su base oraria, le quali non risultano dunque coordinate con l'effettiva richiesta su base 15 minuti.
- Analogo ragionamento può essere fatto per il secondo caso del tasso di priorità e con capacità ottimale costante: su base oraria vengono prodotti 164 movimenti totali (22 voli in arrivo e 19 in partenza), pari alla domanda; tuttavia, alla fine del periodo risultano in coda 10 velivoli totali.

Da questi confronti, si evince dunque come la distribuzione dinamica delle capacità ottime tra arrivi e partenze permetta di raggiungere un uso più razionale delle risorse di-

sponibili, congruente con l'effettiva domanda di trasporto; questa procedura può dunque essere molto efficace nella risoluzione pratica di problemi di congestione.

In conclusione dell'esempio, appare opportuno evidenziare come il risultato ottenuto sia stato possibile grazie all'evidente fluttuazione nell'andamento dei livelli di domanda (picchi di partenze alternati a picchi di arrivi): una capacità ottima dinamica, che si adatti da intervallo ad intervallo ai livelli di domanda effettivamente in atto, è senz'altro utile in questo contesto. Viceversa, qualora vi sia scarsa variabilità nei livelli di domanda, può essere sufficiente procedere ad un'ottimizzazione delle risorse che preveda una ripartizione costante dei livelli di capacità fra arrivi e partenze per l'intero periodo in cui si prevedono episodi di congestione.

Nella figura 2-24 seguente vengono illustrati graficamente i risultati ottenuti.



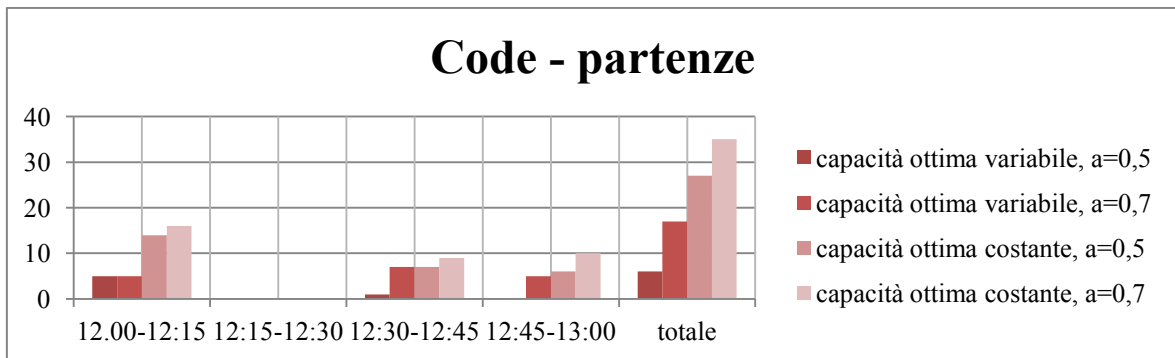
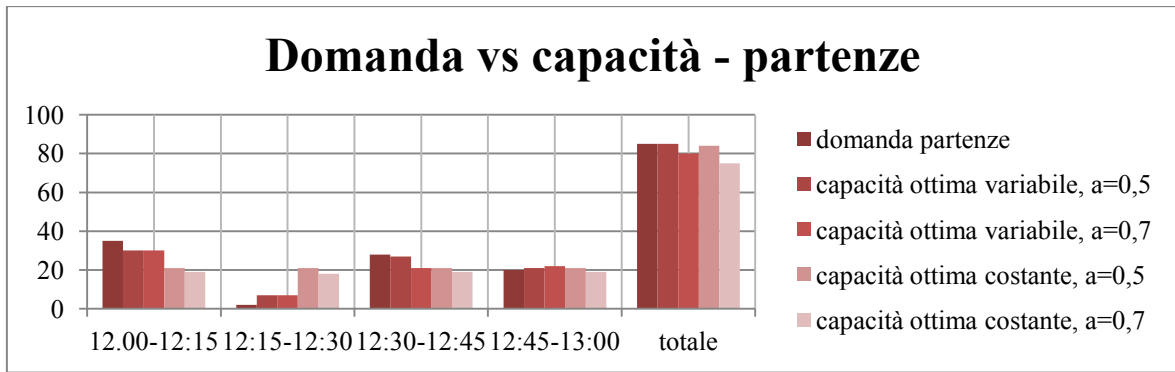


Figura 2-24: Risultati dell'ottimizzazione [Elaborazione su dati Gilbo, 1993]

CAPITOLO 3

CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha analizzato il tema della capacità aeroportuale, con specifico riguardo alla sua valutazione, gestione ed ottimizzazione: sono stati delineati i fattori interni ed esterni che la influenzano, le principali normative che la regolano, alcune teorie analitiche e metodi che consentono di valutarla ed ottimizzarla a parità di risorse disponibili.

Si è visto che in ambito aeroportuale il traffico aereo è soggetto a regole che vertono sulla sicurezza dei movimenti (imponendo un minimo distanziamento tra i velivoli) e sul numero di operazioni totali che possono essere svolte nella pista di volo. Queste limitazioni non possono essere scollegate dalle attività *più ingegneristiche* che riguardano l'analisi globale dell'infrastruttura, ovvero la sua pianificazione e la sua progettazione.

Permettere al mercato aereo una sorta di deregulation, senza l'imposizione di un limite massimo ai movimenti orari, ad esempio, comporta che è ragionevole aspettarsi la *necessità* di un ingente investimento in opere infrastrutturali: la stessa Circolare FAA più volte citata nei capitoli precedenti ammette infatti che, *non potendosi imporre un limite alle operazioni schedulate, è necessario intervenire sul lato dell'offerta di capacità, migliorandone le infrastrutture*. È evidente che un tale concetto non può essere applicabile in contesti, come quello Europeo (e soprattutto italiano), in cui una sensibilità per i temi ambientali molto sviluppata da parte della collettività, un'accentuata antropizzazione del territorio e soprattutto una proprietà tendenzialmente pubblica delle infrastrutture (e dunque con limitate risorse finanziarie) non permettono sviluppi infrastrutturali tali da consentire la libera programmazione di voli da parte delle compagnie aeree, in particolare in quegli aeroporti che sono già soggetti a congestione e non hanno ragionevoli possibilità di sviluppo fisico.

Viceversa, in alcuni contesti sarebbe opportuno procedere a rendere più stringenti le regolamentazioni ai fini di un più efficace utilizzo della capacità; si è visto che la capacità viene misurata in movimenti orari, tuttavia, alcune operazioni aeroportuali (si pensi al rullaggio) non sono dipendenti dalla tipologia di aereo: la velocità di percorrenza delle *taxiways*, ad esempio, è molto simile sia per aerei di grosse dimensioni sia per aerei di piccole dimensioni. L'occupazione dell'infrastruttura è la stessa, ma la capacità prodotta in termini effettivi per unità di tempo – ovvero, il numero di passeggeri trasportabili – non è confron-

tabile. Analogo ragionamento può essere fatto per aerei caratterizzati – tipicamente – da un alto fattore di carico in confronto a voli contraddistinti da un ridotto tasso di riempimento. Dunque, in un’ottica di migliore sfruttamento delle opere infrastrutturali già disponibili, sarebbe auspicabile “forzare” le compagnie aeree ad un utilizzo più efficiente della quota di capacità assegnata loro tramite la concessione dello slot aeroportuale.

Per quanto riguarda l’attività di progettazione delle opere infrastrutturali di un aeroporto (in particolare del lato *airside*), essa dovrebbe essere sempre più posta in relazione con un’attenta pianificazione del sistema di trasporto aereo e di previsione della sua domanda d’uso e, in un’ottica più ampia, con la pianificazione del sistema multimodale dei trasporti.

Si è visto che la capacità di una *runway* è inversamente proporzionale ai distanziamenti minimi richiesti tra i movimenti e che questi sono tanto maggiori quanto più è disomogeneo il traffico aereo: a livello operativo, nel caso di compresenza di diverse tipologie di aeromobili, per ridurre questi distanziamenti le operazioni dovrebbero avvenire attraverso una sequenza di plotoni di aerei dalle caratteristiche omogenee, limitando i distanziamenti maggiori agli intertempi tra diverse tipologie di plotoni. A livello infrastrutturale, si può intervenire aggiungendo piste parallele, di lunghezza inferiore a quella della pista principale, ed il cui utilizzo sia limitato a categorie di aerei di dimensioni ridotte: si avrebbe un vantaggio sugli intertempi (con aumento della capacità) e un vantaggio di minore impatto acustico al di fuori del sedime aeroportuale, grazie all’arretramento della soglia di pista.

La capacità dell’*airside* è influenzata notevolmente da particolari caratteristiche del layout che, in confronto alla pista di volo, potrebbero essere considerate minori ma che, in realtà, permettono un più efficace utilizzo della pista, riducendo l’occupazione della stessa (ad esempio, una maggiore presenza di uscite in *taxiway*) ed aumentando il numero di movimenti che essa può accogliere.

Per le gestione delle infrastrutture aeroportuali, come evidente dall’applicazione numerica riguardante l’ottimizzazione riportata nella sezione 2.8, è sempre più necessario avere dati sulla domanda d’uso *in tempo reale* così da poterli utilizzare per adeguare alla domanda realmente in atto tutti i fattori potenzialmente variabili del sistema di offerta. Infatti, nell’esempio trattato veniva ottimizzata la capacità solamente variando la sua quota di ripartizione fra arrivi e partenze.

Con strumenti più avanzati, si può contare su variazioni delle configurazioni di utilizzo di pista o su istruzioni fornite ai singoli velivoli che permettano un ordine di arrivo tale da minimizzare i perditempo.

BIBLIOGRAFIA

- ACL (Airport Coordination Limited), Pubblicazioni online, www.acl-uk.org;
- AENA (Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea), Pubblicazioni online, <https://sede.aena.gob.es/>;
- Assoclearance, Pubblicazioni online, www.assoclearance.it;
- Ball et al., Handbook in OR & MS, Vol. 14, Elsevier, 2007;
- Blumstein A., The landing capacity of a runway, Operations Research, 7(1), 752-763, 1959;
- ENAC, Pubblicazioni online, www.enac.gov.it;
- ENAV, Compendi 77-155, 643-736, Pubblicazioni online;
- EUACA, online Publications, www.euaca.org;
- FAA, Advisory Circular AC 150/5060-5, Airport Capacity and Delay;
- FAA, online Publications, www.faa.gov;
- FAA, Notice JO 7210.33, Simultaneous Widely Spaced Parallel Operations, 2012;
- FAA, Order JO 7110.65, Air Traffic Control, 2012;
- GAO, Slot-controlled airports, Report to the Committee on Commerce, Science and Transportation, US Senate, September 2012, [GAO-12-902];
- Gilbo E.P., Airport capacity: representation, estimation, optimization, IEEE Transactions on Control System Technology, 1(3), 144-153, 1993;
- ICAO, Working Paper, Slot Allocation, 2013;
- ICAO, Pubblicazioni online, www.icao.int/meetings/atconf6;
- IATA, Pubblicazioni online, www.iata.org/publications;
- IATA, Worldwide Slot Guidelines, 5th Edition, August 2013;
- La Franca L., Castelluccio F., Cappelli A., La capacità aeroportuale, 2008;
- Newell G.F., Airport capacity and delays, Transportation science, 13(3), 201-241, 1979;
- Odoni A.R. et al., Existing and required modeling capabilities for evaluating ATM systems and concepts, Technical report, International Centre for Air Transportation, Massachusetts Institute of Technology, NAG2-997, 1997;
- Odoni A.R. et al., Optimal selection of airport runway configurations, Operations Research, 59(6), Nov-Dec 2011, pp. 1407-1419;

- Pasetto M., Giacomello G., et al., Progettazione di infrastrutture aeroportuali, Pubblicazioni online, 2011;
- Potts C.N., Mesgarpour M., Bennel J.A., A review of airport runway optimization, University of Southampton, 2009;
- SCA (Schedule Coordination Austria), Pubblicazioni online, www.slots-austria.com;
- Steer Davies Gleave, Study to support the revision of the Slot Regulation, Final report prepared for the European Commission, July 2013;
- Steer Davies Gleave, Impact assessment revisions to Regulation 95/93/CEE, Final report prepared for the European Commission, March 2011;
- Studio Ambrosetti, Pubblicazioni online;
- Swedish W.J., Upgraded airfield capacity model, Technical report, The MITRE corporation, MTR-81W16, 1981;
- Transportation Research Board, Airport Cooperative Research Program, Report 79, Evaluating Airfield Capacity, 2012-